

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matej Buntić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac, dipl. ing.

Student:

Matej Buntić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru, profesoru Darku Kozarcu, na korisnim savjetima i strpljenju. Zahvaljujem se svojem prijatelju Roku Ćibariću na ustupanju svojeg osobnog vozila za eksperimentalna mjerenja. Također, zahvaljujem se mr. sc. Krunoslav Ormužu na pomoći pri pronalaženju potrebnih dijelova za vozilo. Zahvaljujem se dipl. ing. Miroslavu Jakiću koji je izveo sve preinake na vozilu. Zahvaljujem se Centru za vozila Hrvatske na stručnoj i financijskoj pomoći pri eksperimentalnom ispitivanju.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji bez koje ne bih mogao doći do krune svojeg dosadašnjeg obrazovanja.

Matej Buntić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, broдостrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matej Buntić**

Mat. br.: 0035195401

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija pročišćavanja ispušnih plinova u trokomponentnom katalizatoru Ottovog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation of the Exhaust Gas After-Treatment in a Three-Way Catalyst of a Spark Ignited Engine**

Opis zadatka:

Emisije štetnih tvari iz motora s unutarnjim izgaranjem jedan su od važnih faktora prilikom razvoja novih motora. S obzirom da trenutni propisi zahtijevaju vrlo niske razne emisija štetnih tvari većina novih automobilskih motora opremljena je nekim od uređaja za pročišćavanje ispušnih plinova, tzv. katalizatorima. Kod Ottovih motora već dulji niz godina koristi se tzv. trokomponentni katalizator koji istovremeno pročišćava sve tri grupe štetnih plinova, neizgorjele ugljikovodike, ugljikov monoksid i dušikove okside. Razvoj motora u današnje vrijeme nezamisliv je bez upotrebe numeričkih simulacija pa su stoga u kontekstu štetnih emisija razvijeni proračunski modeli za simulaciju pročišćavanja ispušnih plinova. U ovom radu potrebno je evaluirati proračunske modele za simulaciju pročišćavanja ispušnih plinova ugrađene u programski paket AVL Boost. U tu svrhu potrebno je:

- Odabrati vozilo koje je opremljeno s trokomponentnim katalizatorom i regulacijom smjese s povratnom vezom
- Na odabranom vozilu izmjeriti emisije štetnih tvari ispred i nakon katalizatora u nekoliko radnih točaka motora pod opterećenjem.
- Izraditi proračunski model motora odabranog vozila u programu AVL Boost, te ga validirati u radnim točkama korištenim prilikom mjerenja emisija.
- Na validiranom modelu pripremiti i provesti proračun pročišćavanja ispušnih plinova u trokomponentnom katalizatoru za izmjerene radne točke.
- Analizirati rezultate i izvesti zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
15. studenog 2018.

Datum predaje rada:
17. siječnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
23., 24. i 25. siječnja 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VII
POPIS OZNAKA	VIII
POPIS KRATICA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD	1
1.1. Motori s unutarnjim izgaranjem.....	1
1.2. Štetna emisija motora s unutarnjim izgaranjem	1
1.2.1. Trokomponentni katalizator	3
1.2.2. Mjerenje štetnih emisija i pregled dopuštenih razina.....	5
1.3. Razvoj motora i motornih vozila	6
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	8
3. STRATEGIJA I REZULTATI MJERENJA.....	10
3.1. Odabrano vozilo	10
3.2. Preinake na odabranom vozilu potrebne za mjerenje prije katalitičke obrade.....	11
3.2.1. Hermeto spoj	11
3.2.2. Mjesto postavljanja spojnice	12
3.3. Mjerni uređaji.....	13
3.3.1. Valjci za mjerenje snage vozila	13
3.3.2. Uređaj za mjerenje štetne emisije	14
3.4. Eksperimentalno mjerenje.....	15
3.4.1. Postavljanje vozila na valjke za mjerenje snage i spajanje na uređaj za mjerenje	17
3.4.2. Mjerenje ispušnih plinova.....	19
3.4.2.1. Proračun udjela mokrih ispušnih plinova	19

3.5. Rezultati dobiveni mjerenjem	22
4. STRATEGIJA I REZULTATI SIMULACIJA.....	29
4.1. Programski paket AVL Boost	29
4.2. Simulacija ciklusa rada motora	30
4.2.1. Obrada rezultata dobivenih u programskom paketu Boost.....	30
4.2.2. Model ciklusa rada motora.....	31
4.2.3. Vrijednosti potrebne za simulaciju obrade ispušnih plinova	34
4.3. Simulacija obrade ispušnih plinova	36
4.3.1. Model obrade ispušnih plinova	36
4.3.2. Vanjski uvjeti	37
4.3.3. Katalizator	40
4.3.3.1. Značajka tipa	41
4.3.3.2. Diskretizacija	42
4.3.3.3. Fizikalne osobine katalizatora.....	45
4.3.3.4. Gubitak topline.....	46
4.3.3.5. Međusloj	46
4.4. Rezultati dobiveni simulacijama	49
4.4.1. Model 1	51
4.4.2. Model 2	53
4.4.3. Model 3	55
4.4.4. Model 4	56
4.4.5. Usporedba izmjerenih i simuliranih vrijednosti.....	58
5. ZAKLJUČAK.....	62
LITERATURA.....	63
PRILOZI.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1. Sastav ispušnih plinova Ottovog motora [1]	2
Slika 2. Utjecaj faktora pretička zraka na stvaranje štetnih spojeva[1]	2
Slika 3. Rad trokomponentnog katalizatora ovisan o faktoru pretička zraka [1]	4
Slika 4. Uspješnost katalitičke pretvorbe ovisna o temperaturi u katalizatoru [2].....	4
Slika 5. Shema katalizatora [3]	5
Slika 6. Shematski prikaz ispitnog postava za štetne emisije [1]	6
Slika 7. Fiat Punto 2008.	10
Slika 8. Prikaz Hermeto spoja [6]	11
Slika 9. Tehnička dokumentacija Hermeto spojnice korištene za ispitivanje [7]	12
Slika 10. Dimenzije Hermeto spojnice korištene za mjerenje [7].....	12
Slika 11. Lijevo: Smještaj originalne ispušne grane FIAT-a Punta; Desno: Ispušne cijevi i katalizator	12
Slika 12. Valjci MAHA LPS 3000.....	13
Slika 13. Shema uređaja [9]	14
Slika 14. Lijevo: Tecnotest 488; Desno: Primjer ispisanih rezultata [9]	15
Slika 15. Mjerne točke prikazane u mapi rada motora.....	16
Slika 16. Učvršćivanje vozila ovisno o pogonu [8]	17
Slika 17. Osiguranje prednjeg kraja vozila od ispadanja iz mjernih valjaka	17
Slika 18. Osiguranje stražnjeg kraja vozila od ispadanja.....	18
Slika 19. Lijevo: Hermeto spoj i cijev; Desno: Mjerač temperature ulja.....	18
Slika 20. Ispitni postav	19
Slika 21. Izmjereni količinski udio CO izmjeren prije katalitičke obrade	22
Slika 22. Izmjereni količinski udio CO nakon katalitičke obrade.....	22
Slika 23. Izračunata uspješnost katalitičke pretvorbe CO.....	23
Slika 24. Izmjereni količinski udio HC prije katalitičke obrade	23
Slika 25. Izmjereni količinski udio HC nakon katalitičke obrade.....	24
Slika 26. Izračunata uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovodika	24

Slika 27. Izmjereni količinski udio CO ₂ prije katalitičke obrade.....	25
Slika 28 Izmjereni količinski udio CO ₂ poslije katalitičke obrade	25
Slika 29. Izmjereni količinski udio O ₂ prije katalitičke obrade	26
Slika 30. Izmjereni količinski udio O ₂ poslije katalitičke obrade	26
Slika 31. Izračunati količinski udio H ₂ O prije katalitičke obrade.....	27
Slika 32. Izračunati količinski udio H ₂ O poslije katalitičke obrade	27
Slika 33. Faktor pretička zraka ispred katalizatora	28
Slika 34. Konvergencija snage pri 3500 min ⁻¹	30
Slika 35. Shema modela za simulaciju rada motora.....	32
Slika 36. Poklapanje snage dane od strane proizvođača i dobivene simulacijom.....	33
Slika 37. Simulirana srednja specifična efektivna potrošnja i potreban oktanski broj goriva .	33
Slika 38. Kut otvorenosti zaklopke ovisno o brzini vrtnje i opterećenju	35
Slika 39. Poklapanje izmjerenog i simuliranog momenta.....	35
Slika 40. Shema modela za obradu ispušnih plinova	36
Slika 41. Utjecaj temperature na uspješnost katalitičke obrade HC i CO	38
Slika 42. Količinski udio kisika nakon katalitičke obrade bez korektivnog koeficijenta	38
Slika 43. Količinski udio kisika nakon katalitičke obrade s korektivnim koeficijentom.....	39
Slika 44. Utjecaj veličine hidrauličkog promjera na uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovodika (lijevo) i ugljikovog monoksida (desno)	41
Slika 45. Utjecaj udjela površine monolita na uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovodika (lijevo) i ugljikovog monoksida (desno)	42
Slika 46. Zagrijavanje monolita katalizatora kod 1-D diskretizacije	43
Slika 47. Zagrijavanje monolita katalizatora kod 2-D diskretizacije za radijalne pozicije 0 i 1	43
Slika 48. Osnovne reakcije oksidacije i redukcije.....	49
Slika 49. Reakcije oksidacije i redukcije cerijevih oksida	49
Slika 50. Reakcije oksidacije i redukcije rodija	50
Slika 51. Reakcije oksidacije i redukcije barijevog karbonata i nitrata	50
Slika 52. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 1	51

Slika 53. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 1	51
Slika 54. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO _x za model 1	52
Slika 55. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 2	53
Slika 56. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 2	53
Slika 57. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO _x za model 2	54
Slika 58. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 3	55
Slika 59. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 3	55
Slika 60. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO _x za model 3	56
Slika 61. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 4	57
Slika 62. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 4	57
Slika 63. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO _x za model 4	58
Slika 64. Usporedba uspješnosti pretvorbe HC za simulaciju i za izmjerene vrijednosti	59
Slika 65. Usporedba uspješnosti pretvorbe CO za simulaciju i za izmjerene vrijednosti	59
Slika 66. Usporedba količinskog udjela kisika nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje	60
Slika 67. Usporedba količinskog udjela CO ₂ nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje	60
Slika 68. Usporedba količinskog udjela H ₂ O nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dopuštene razine štetne emisije [1]	6
Tablica 2. Tehničke specifikacije automobila.....	10
Tablica 3. Vrijednosti i nazivi izmjerenih točaka	16
Tablica 4. Vrijednosti Vibeovih parametra korištenih kod izgaranja pri punom opterećenju .	34
Tablica 5. Vrijednosti potrebne za simulaciju obrade ispušnih plinova	36
Tablica 6. Vrijednosti korištene za vanjske uvjete simulacije obrade ispušnih plinova	40
Tablica 7. Korištene vrijednosti veličina značajki tipa	42
Tablica 8. Korištene vrijednosti veličina značajki tipa	45
Tablica 9. Korištene vrijednosti veličina značajki tipa	45
Tablica 10. Korištene vrijednosti veličina gubitka topline	46

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA Naziv iz sastavnice

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	[-]	Vibeov parametar potpunosti
k_{HC}	[-]	Korektivni koeficijent količine ugljikovodika
m	[-]	Vibeov parametar oblika izgaranja
M_e	[Nm]	Efektivni moment motora
n	[min ⁻¹]	Brzina vrtnje motora
$n_{\text{CO}_2}^P$	[mol]	Broj molova produkata ugljikovog dioksida
$n_{\text{CO}_2}^R$	[mol]	Broj molova reaktanata ugljikovog dioksida
$n_{\text{H}_2\text{O}}^P$	[mol]	Broj molova produkata vodene pare
$n_{\text{N}_2}^P$	[mol]	Broj molova produkata dušika
$n_{\text{N}_2}^R$	[mol]	Broj molova reaktanata dušika
$n_{\text{O}_2}^P$	[mol]	Broj molova produkata vodene pare
$n_{\text{O}_2}^R$	[mol]	Broj molova reaktanata kisika
n_{CH}^P	[mol]	Broj molova produkata ugljikovodika
n_{CH}^R	[mol]	Broj molova reaktanata ugljikovodika
n_{CO}^P	[mol]	Broj molova produkata ugljikovog monoksida
n_{CO}^R	[mol]	Broj molova reaktanata ugljikovog monoksida
n_i^P	[mol]	Broj molova pojedinih produkata
n_{mokrih}	[mol]	Ukupni broj molova mokrih plinova
n_{suhih}	[mol]	Ukupni broj molova suhih plinova
P	[kW]	Snaga motora
p_i	[bar]	Tlak na izlazu iz katalizator
p_u	[bar]	Tlak na ulazu u katalizator
Q_{MP2}	[kgm ⁻³]	Maseni protok na ulazu u katalizator
T_k	[K]	Temperatura katalizatora

T_u	[K]	Temperatura na ulazu u katalizator
U_i	[%]	Uspješnost katalitičke obrade
X	[-]	Broj atoma ugljika u ugljikovodiku
Y	[-]	Broj atoma vodika u ugljikovodiku
y_{CO_2}	[%]	Količinski udio ugljikovog dioksida
$y_{CO_2}^{suhih}$	$\left[\frac{mol}{mol}\right]$	Količinski udio CO ₂ u suhim ispušnim plinovima
$y_{H_2O}^{mokrih}$	$\left[\frac{mol}{mol}\right]$	Količinski udio vodene pare u mokrim plinovima
y_{O_2}	[%]	Količinski udio kisika
y_{CO}	[%]	Količinski udio ugljikovog monoksida
y_{CO}^{suhih}	$\left[\frac{mol}{mol}\right]$	Količinski udio CO u suhim ispušnim plinovima
y_{HC}	[ppm]	Količinski udio ugljikovodika
y_{HC}^{suhih}	$\left[\frac{mol}{mol}\right]$	Količinski udio HC u suhim ispušnim plinovima
$y_j^{N_s}$	[-]	Količinski udio pojedinih plinova nakon korekcije zbog dodatne struje zraka
y_i^I	[-]	Količina supstituenta dimnih plinova prije katalitičke obrade
y_i^N	[-]	Količina supstituenta dimnih plinova poslije katalitičke obrade
y_i^{mokrih}	$\left[\frac{mol}{mol}\right]$	Količinski udio pojedinih mokrih dimnih plinova
y_i^{suhih}	$\left[\frac{mol}{mol}\right]$	Količinski udio pojedinih suhih dimnih plinova
α_p	[°]	Vibeov parametar početka izgaranja
$\Delta\alpha$	[°]	Vibeov parametar trajanja izgaranja
λ	$\left[\frac{kg_G}{kg_Z}\right]$	Faktor pretička zraka

POPIS KRATICA

Oznaka	Naziv
Ba(CO ₃) ₂	Barijev karbonat
Ba(NO ₃) ₂	Barijev nitrat
BMEP	Srednji efektivni tlak (eng Brake mean effective pressure)
C ₃ H ₆	Propen
C ₈ H ₁₈	Oktan
Ce ₂ O ₃	Cerijev (III) oksid
CeO ₂	Cerijev (II) oksid
CO	Ugljikov (I) oksid/ Ugljikova monoksid
CO ₂	Ugljikov (II) oksid/Ugljikov dioksid
EGR	Povrat ispušnih plinova (eng. <i>Exhaust Gas Recirculation</i>)
H ₂	Vodik
H ₂ O	Voda/vodena para
HC	Ugljikovodici
N ₂	Dušik
NEDC	Eng. <i>New European Driving Cycle</i>
NMHC	Nemetanski ugljikovodici
NO	Dušikov (I) oksid
NO ₂	Dušikov (II) oksid
NO _x	Dušikovi oksidi
O ₂	Kisik
Rh	Rodij
RhO	Rodijev oksid
SCR	Selektivna katalitička redukcija (eng. <i>Selective Catalytic Reduction</i>)
WLTC	Eng. <i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i>

SAŽETAK

Kako bi pratili sve strože standarde na emisiju štetnih plinova, proizvođači se susreću sa sve većim preprekama pri razvoju sustava za obradu ispušnih plinova. U tom procesu pomaže im korištenje simulacijskih programa zbog manjeg financijskog i vremenskog troška, no postavlja se pitanje točnosti istih. U tu svrhu, za ovaj rad napravljeno je eksperimentalno mjerenje štetne emisije vozila pogonjenog nenabijenim motorom s vanjskim izvorom paljenja opremljenog s trokomponentnim katalizatorom pri brzinama vrtnje od 1500, 2500 i 3500 min⁻¹ i različitim opterećenjima. Mjerni uzorci su uzeti prije te nakon katalitičke obrade ispušnih plinova, a izmjereni su količinski udjeli kisika (O₂), ugljikovog dioksida (CO₂), ugljikovog monoksida (CO), ugljikovodika (HC) te faktor pretička zraka (λ). Zatim je u svrhu dobivanja vanjskih uvjeta obrade ispušnih plinova napravljen simulacijski model motora vozila validiran na najveću efektivnu snagu vozila u programskom paketu AVL Boost. Naposljetku, u istom programskom paketu, napravljen je model trokomponentnog katalizatora s nekoliko inačica koje uključuju različite kemijske reakcije oksidacije i redukcije ispušnih plinova te reakcije punjenja i pražnjenja površine međusloja koja sadrži rodij, barijev karbonat i cerijev (III) oksid. Ključne riječi: AVL Boost, Obrada ispušnih plinova, trokomponentni katalizator

SUMMARY

Car manufacturers are facing ever-growing obstacles when developing gas exhaust aftertreatment systems in order to meet stringent emission standards. Manufacturers use simulation software in the process to decrease both financial and time costs. By doing so, the question of precision of such software emerges. To better understand the result of using such software, experimental measurement of pollutant emission was conducted on a car driven by a normally aspirated spark ignition engine and equipped with a three-way catalyst system. The pollutant emissions were measured for engine speeds of 1500, 2500 and 3500 rpm and different engine loads. Samples were collected both before and after the catalytic conversion. The results uncovered mole fractions of oxygen (O_2), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2), hydrocarbons (HC), and air-fuel ratio were measured. Afterwards, a simulation model of the car's engine was made and validated by maximum power in the simulation software, *AVL Boost*, in order to gain aftertreatment boundary conditions. Lastly, an aftertreatment simulation model of a three-way catalyst with several versions including different chemical reactions of oxidation and reduction of exhaust gases and reactions of oxidation and reduction of cerium, rhodium, and barium on the washcoat surface was made in the same software.

Keywords: AVL Boost, Exhaust Gas Aftertreatment, Three-way Catalyst

1. UVOD

1.1. Motori s unutarnjim izgaranjem

Danas se za pogon cestovnih vozila gotovo isključivo koriste klipni motori s unutarnjim izgaranjem. Takvi motori pretvaraju kemijsku energiju goriva u toplinsku energiju plinova koji svojom ekspanzijom daju mehanički rad na radilici motora. Kao gorivo uglavnom koriste benzinsko i dizelsko gorivo, iako se u novije vrijeme često koriste i ukapljeni naftni plin, prirodni plin te alkohol [1]. Motori s unutarnjim izgaranjem podijeljeni su na dvije osnovne vrste: motore sa stranim izvorom paljenja (Otto) i motori sa samozapaljenjem (Diesel).

1.2. Štetna emisija motora s unutarnjim izgaranjem

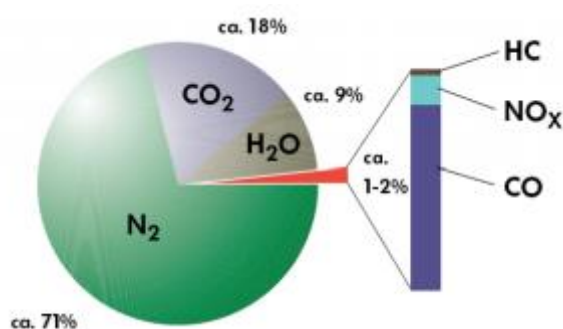
Motori s unutarnjim izgaranjem proizvode ispušne plinove koji sadrže preko sto različitih kemijskih spojeva koji su na neki način štetni za okoliš [1]. Kako bi se smanjilo onečišćenje, homologacijskim propisima ograničena je količina štetnih plinova koje cestovna vozila ispuštaju u okoliš. Ograničenje se odnosi na emisiju [1]:

- Ugljikovog monoksida (CO)
- Ugljikovodika (HC)
- Dušikovih oksida (NO_x)
- Čestica sastavljenih većinom od čađe
- Nemetanskih ugljikovodika (NMHC) od 2005. godine

Podizanjem svijesti o štetnom utjecaju na okoliš, proizvođači vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem susreću se sa sve većim zahtjevima na emisiju štetnih plinova. Kako bi se smanjila emisija, raznim načinima smanjuje se udio nastalih i emitiranih štetnih plinova. Temelji smanjenja onečišćenja su [1]:

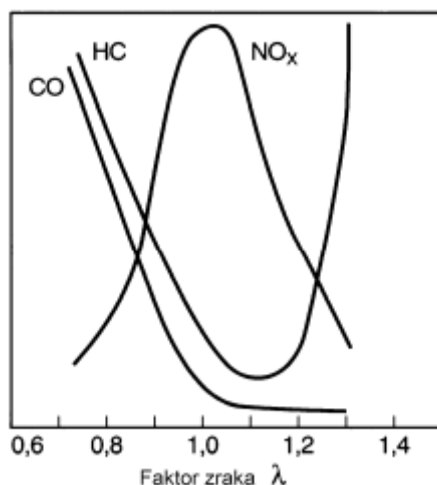
- Optimiranje procesa izgaranja u cilindru,
- Pročišćavanje ispušnih plinova nakon što u izašli iz motora,
- Poboljšanje kvalitete goriva,
- Smanjenje otpora vožnje
- Optimiranje upravljanja radom motora i vozila u cjelini.

Pročišćavanje ispušnih plinova nakon što su izašli iz motora uvelike ovisi o vrsti motora (Otto ili Diesel) te radi li motor sa stehiometrijskom smjesom ili sa siromašnom. Tako, kod motora koji rade sa stehiometrijskom smjesom, mahom Otto motora, dostatno je korištenje trokomponentnog katalizatora. Kod Ottovih motora koji rade s direktnim ubrizgavanjem i siromašnom smjesom uz trokomponentni katalizator koristi se i apsorpcijski katalizator s ili bez povrata ispušnih plinova (EGR-a). Kod dieselskih motora, koji rade s vrlo siromašnom smjesom, štetna emisija CO i HC je malena u odnosu na emisiju čestica i ugljikovih oksida pa se koriste kombinacija EGR-a i filtera čestica te selektivna katalitička redukcija (SCR).



Slika 1. Sastav ispušnih plinova Ottovog motora [1]

Slika 1 prikazuje sastav ispušnih plinova Ottovog motora. Iz slike je vidljivo da je udio štetnih plinova vrlo malen, ali njihov utjecaj na okoliš i zdravlje čovjeka je značajan.



Slika 2. Utjecaj faktora pretička zraka na stvaranje štetnih spojeva[1]

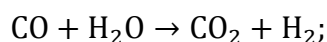
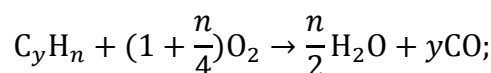
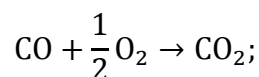
Slika 2 prikazuje utjecaj faktora pretička zraka na stvaranje HC, CO i NO_x. Povećanjem faktora pretička zraka pada količina nastalog CO zbog povećanja količine kisika dostupnog za izgaranje. Količina nastalih ugljikovodika najprije pada do vrijednosti pretička zraka od oko

1,1 nakon čega ponovo raste. Pad se događa zbog povećanja količine kisika dostupnog za izgaranje, a rast zbog prevelike količine kisika. Naime, većom količinom kisika se smanjuje i temperatura izgaranja u cilindru potrebna za širenje plamena pa na rubovima ostaje dio neizgorene smjese. Količina nastalih NO_x raste do stehiometrijske smjese nakon čega pada. Uzrok rasta je povećanje količine kisika dostupnog za izgaranje, a uzrok pada daljnjim rastom količine kisika je pad temperature u cilindru.

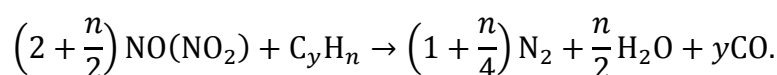
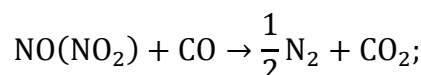
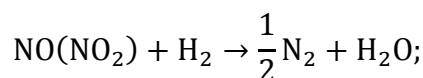
1.2.1. Trokomponentni katalizator

Trokomponentni katalizator koristi se za smanjivanje emisija CO, HC te NO_x .

U trokomponentnom katalizatoru odvijaju se sljedeće osnovne reakcije oksidacije :



Te sljedeće osnovne reakcije redukcije:



Uspješnost katalitičke obrade opisuje se kao:

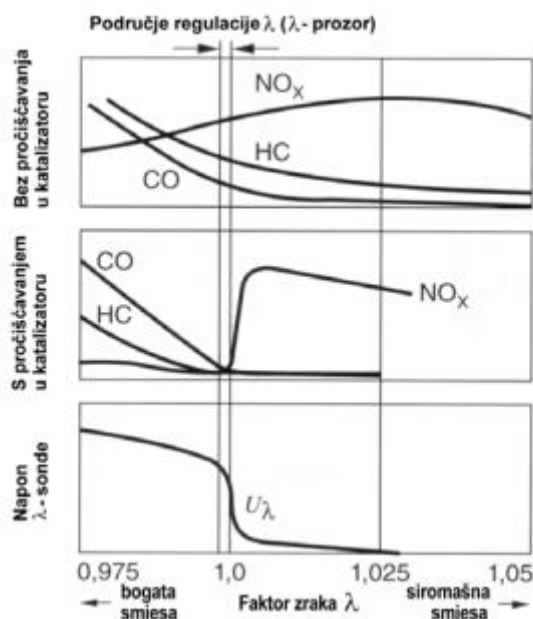
$$U_i = \frac{y_i^I - y_i^N}{y_i^I} \cdot 100 [\%]. \quad (1)$$

Gdje oznaka y_i^I označava količinski udio pojedinog plina prije katalitičke obrade, dok oznaka y_i^N označava količinski udio pojedinog plina nakon katalitičke obrade

Kako bi katalizator radio s visokom uspješnosti, potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete [1]:

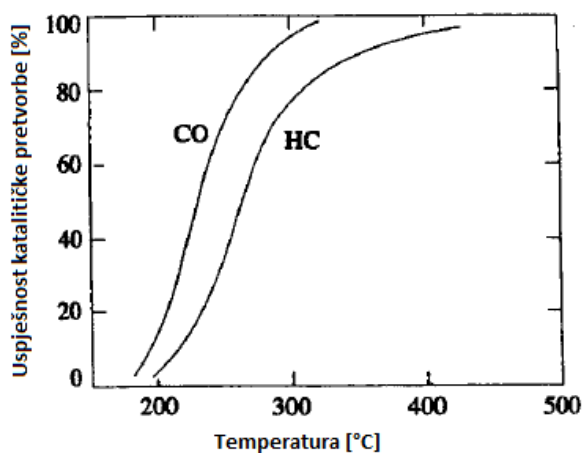
1. Motorno gorivo ne smije sadržavati olovo,
2. Goriva smjesa mora biti gotovo stehiometrijska ($\lambda = 1.00 \pm < 3\%$),
3. Katalizator mora biti zagrijan na visoku temperaturu ($T > 600^\circ\text{C}$).

Olovo u gorivu je služilo za poboljšanje oktanskog broja benzinskog goriva, ali je bilo pogubno za okoliš i čovjekovo zdravlje te se taloži na aktivni sloj u katalizatoru.



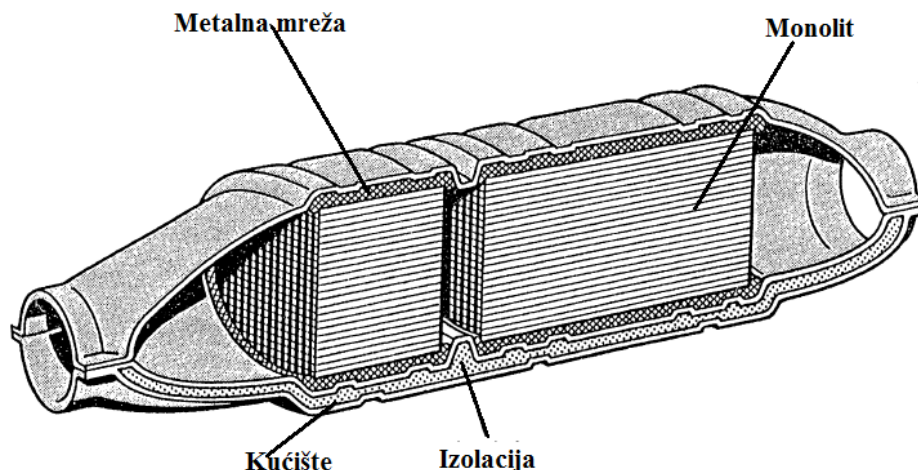
Slika 3. Rad trokomponentnog katalizatora ovisan o faktoru pretička zraka [1]

Drugi uvjet, odnosno zahtjev stehiometrijske smjese izgaranja najviše utječe na uspješnost katalitičke pretvorbe. Prema slici 3, vidljivo je da pri radu motora s bogatom smjesom raste količina emitiranih molekula CO i HC, a pri radu sa siromašnom smjesom, što je značajka motora s direktnim ubrzigavanjem, raste emisija NO_x dok je emisija CO i HC minimalna. S obzirom da Ottovi motori s vanjskom pripremom smjese rade sa stehiometrijskom smjesom te nemaju problem emisije čestica, u potpunosti su ispunjeni zahtjevi na emisiju štetnih plinova.



Slika 4. Uspješnost katalitičke pretvorbe ovisna o temperaturi u katalizatoru [2]

Treći uvjet, odnosno zagrijanost na visoku temperaturu prikazan je na slici 4. Visoka uspješnost katalitičke pretvorbe CO i HC postignuta je pri temperaturama većim od 300 °C za CO, odnosno 400 °C za HC.



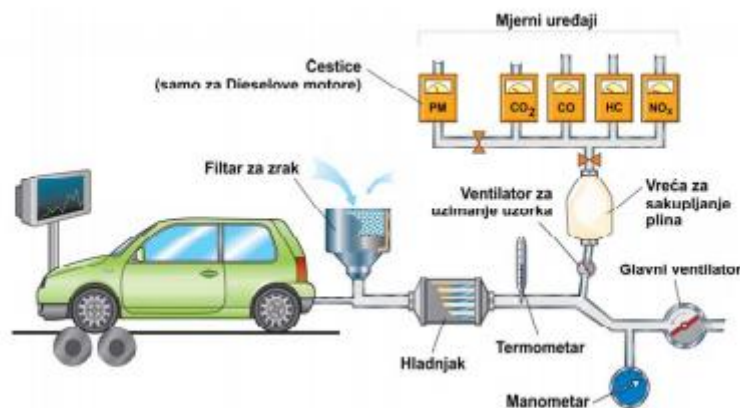
Slika 5. Shema katalizatora [3]

Na slici 5 prikazan je katalizator se sastoji od kućišta, izolacije, metalnog ili keramičkog nosača, međusloja (eng. *Washcoat*) i aktivnog sloja. Nosač je u pravilu napravljen od dva komada kako ne bi došlo do pucanja zbog toplinske dilatacije. Međusloj je u pravilu od poroznog aluminijevog oksida ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) te se na njemu nalazi reaktivni sloj koji je većinom od platine s značajnim udjelom rodija.

1.2.2. Mjerenje štetnih emisija i pregled dopuštenih razina

S ciljem zaštite okoliša i povećanja sigurnosti vozila u prometu, vremenom su nastajali i proširivani homologacijski propisi (ECE - pravilnici). Tako je uveden pravilnik ECE R-83 koji propisuje način mjerenja i dopuštenu razinu emisija štetnih plinova.

Mjerenje štetnih emisija za putnička vozila (M1 kategorija) do rujna 2017. godine mjerilo se na način da se na posebnom ispitnom uređaju u laboratorijskim uvjetima simulirala vožnja prema novom europskom voznom ciklusu (eng. *NEDC*), a ispušni su se plinovi hvatali u posebne vreće gdje bi se analizirao njihov sastav i izračunavala emisija štetnih plinova kako je prikazano na slici 6.



Slika 6. Shematski prikaz ispitnog postava za štetne emisije [1]

Štetne emisije izmjerene na ovaj način obuhvaćaju samo uski režim rada motora pri nižem opterećenju te se stoga postepeno uvodi novi ciklus, "*Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure*" (WLTP). Ovaj ciklus je stroži nego NEDC jer je puno dinamičniji, postižu se veće brzine, veći je prijeđeni put, dulje je trajanje testa, promjene brzina nisu fiksne itd [4].

Dopuštene razine štetnih emisija vozila sa stranim izvorom paljenja u Europskoj uniji propisane su pravilnikom ECE R- 83, a dopuštene razine prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Dopuštene razine štetne emisije [1]

	CO [g/km]	HC [g/km]	HC +NO _x [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [broj/km]
Euro 1	3,16-	1,00	1,13	-	-	-
Euro 2	2,2	0,3	0,5	-	-	-
Euro 3	2,3	0,2	-	0,15	-	-
Euro 4	1	0,1	-	0,08		-
Euro 5	1	0,075	-	0,06	0,005	-
Euro 6	1	0,1	-	0,06	0,005	6 x 10 ¹¹

Oznaka PM odnosi se na maseni udio čestica dok se oznaka PN odnosi na broj čestica.

1.3. Razvoj motora i motornih vozila

Prilikom razvoja motora i motornih vozila, pa tako i komponenti za pročišćavanje ispušnih plinova, koristi se nekoliko različitih metoda: metoda pokušaja i pogrešaka, eksperimentalne metode te računalne simulacije [5].

Metode pokušaja i pogreške dalje se granaju na testiranja prije puštanja u proizvodnju i na testiranje na korisnicima [5]. Testiranja prije puštanja u proizvodnju karakterizira dug period

razvijanja i testiranja vozila, velik broj prototipa i veliki financijski trošak. Testiranje na korisnicima može dovesti do loše reputacije proizvođača te daje lošije rezultate.

Eksperimentalne metode su ciljani testovi na dijelovima i sustavima vozila kojima se simuliraju opterećenja u njihovoj eksploataciji. No, takvi su testovi vrlo skupi.

Računalne simulacije predviđaju ponašanja motora i vozila, služe za identifikaciju ključnih varijabli rada i bolje razumijevanje procesa, ali i kao racionalna baza za inovacije. Omogućuju analizu, sintezu i testiranja. Prema vrsti proračuna dijele se na [5]:

- Metodu konačnih elemenata (MKE)
- Računalnu mehaniku fluida (CFD)
- Termodinamički proračuni (0D-CFD)
- Razne metode rješavanja sustava diferencijalnih jednačbi

Modeli radnog ciklusa motora koriste se u razvoju motora. Kombinacija su 1-D proračuna strujanja fluida te 0-D termodinamičkog proračuna izgaranja u cilindru. Daju preciznije rezultate nego „Real time“ modeli, a vremenski traju znatno kraće nego točniji CFD- proračuni.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Kao što je već u uvodu napisano, kontroliranje štetnih emisija vozila je jedan od ključnih problema s kojim se susreće autoindustrija. Svakom novom direktivom smanjuju se dozvoljene granice štetnih emisija i potrebni su novi načini smanjenja istih. No, i sam ispitni ciklus NEDC je u procesu zamjene s WLTP ciklusom koji će približiti uvjete ispitivanja stvarnim uvjetima vožnje. Dosadašnja praksa dovela je do toga da svako novo osobno vozilo mora imati katalizator za pročišćavanje ispušnih plinova pa je tako razvoj katalizatora od esencijalne važnosti.

Spomenuto je da simulacije rada motora i vozila pri razvoju pomažu proizvođačima da na jeftiniji i jednostavniji način dođu do rezultata koje bi se inače dobile financijski puno skupljim, a vremenski dugotrajnijim procesima ispitivanja.

Stoga, cilj ovog diplomskog rada je evaluacija proračunskih modela katalitičke obrade ispušnih plinova u programskom paketu AVL Boost. Kako bi se model simulacije mogao uspješno evaluirati prvo je potrebno odabrati vozilo, koje u sustavu obrade ispušnih plinova sadrži katalizator. Dalje, potrebno je omogućiti stvarne uvjete vožnje za mjerenja na vozilu pa izvršiti mjerenje sastava ispušnih plinova. Kako bi se utvrdile sve veličine koje su potrebne za simulaciju obrade ispušnih plinova, a nije bilo moguće iste izmjeriti, potrebno je napraviti simulacijski model ciklusa rada motora. Naposljetku, rezultate mjerenja sastava ispušnih plinova treba usporediti s rezultatima simulacija obrade ispušnih plinova.

Vozilo odabrano za rad mora biti pogonjeno motorom sa stranim izvorom paljenja te mora sadržavati funkcionalni trokopolomponentni katalizator.

Stvarni uvjeti vožnje bit će osigurani mjerenjima na valjcima za mjerenje snage. Također, potrebno je definirati radne točke koje omogućuju preslikavanje na cijelo područje rada motora i katalizatora pa kao takve daju osnovu za daljnja istraživanja i razvoj sustava pročišćavanja ispušnih plinova.

Za validaciju simulacija obrade ispušnih plinova potrebno je izmjeriti emisiju štetnih plinova prije i poslije katalitičke obrade. Mjerenje sastava ispušnih plinova poslije katalitičke obrade ne predstavlja veliki problem, čak je i dijelom redovitog godišnjeg tehničkog pregleda, te se provodi tako da se mjerni uređaj, analizator, postavi u auspuh odakle se uzima uzorak ispušnih

plinova. No, mjerenje prije katalitičke obrade zahtijeva izvođenje određenih preinaka na vozilu jer je u protivnom nemoguće doći do uzorka ispušnih plinova. Rad određenih pomoćnih uređaja, poput lambda sonde, potreban za pravilan rad motora, ne smije biti narušen ni na koji način jer se ne bi dobili dobri rezultati.

Pri izradi modela ciklusa rada motora stavit će se naglasak na poklapanje maksimalnih performansi motora kako bi se dobili reprezentativni rezultati veličina potrebnih za simulaciju obrade ispušnih plinova u svim odabranim točkama rada.

3. STRATEGIJA I REZULTATI MJERENJA

3.1. Odabrano vozilo

Vozilo odabrano za mjerenje je Fiat Punto 1,4 8v iz 2008. godine zato što sadrži trokomponentni katalizator i povratnu vezu lambda sonde. Automobil je prošao 115000 km i redovno je održavan. Tehničke specifikacije navedene su u tablici 2.

Tablica 2. Tehničke specifikacije automobila

Tip motora	Četverotaktni Ottov motor bez prednabijanja
Radni volumen motora [dm³]	1,368
Snaga [kW]	57
Godina proizvodnje	2008.
Masa vozila [kg]	1105
Sustav pročišćavanja ispušnih plinova	Trokomponentni katalizator
Lambda sonda	2 (ispred i iza katalizatora)
Razina dopuštene emisije	EURO 4

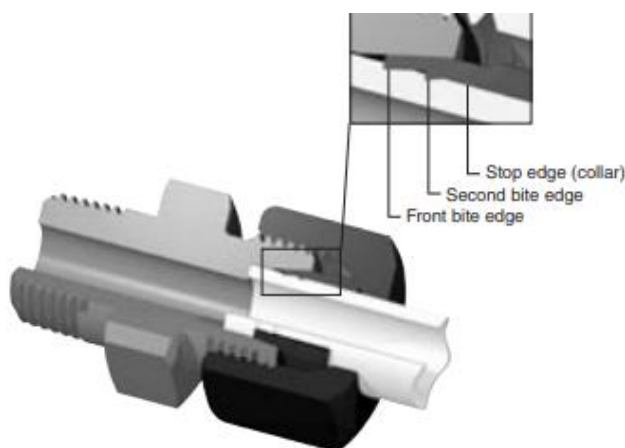


Slika 7. Fiat Punto 2008.

3.2. Preinake na odabranom vozilu potrebne za mjerenje prije katalitičke obrade

Kako je već napomenuto, nemoguće je doći do mjernog uzorka između motora i katalizatora ako se ne naprave određene preinake na vozilu. Preinake moraju omogućiti dolazak struje ispušnih plinova do analizatora bez smetnji na rad motora. Odlučeno je pomoću hermeto spoja omogućiti odvođenje struje ispušnih plinova do analizatora. Preinake na vozilu izveo mag. univ. strojarstva Miroslav Jakić.

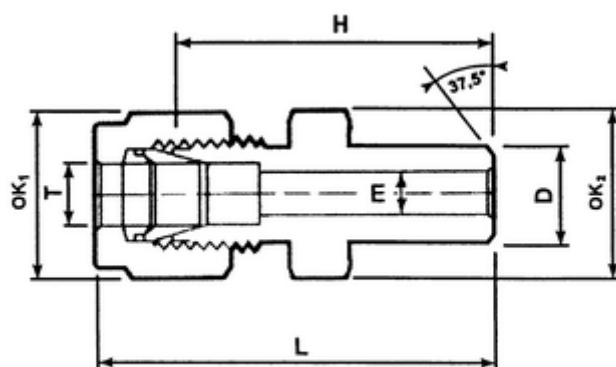
3.2.1. Hermeto spoj



Slika 8. Prikaz Hermeto spoja [6]

Kako bi bilo omogućeno povezivanje mjernog uređaja i struje ispušnih plinova, korišten je Hermeto spoj. Hermeto spoj funkcionira tako što dolazi do progresivnog zarivanja prstena u cijev. Prsteni imaju dvije rezne oštrice. Nakon što se obje oštrice zariju, graničnik brani daljnji pomak. Dobro nasjedanje omogućeno je koničnim unutarnjim presjekom spojnice.

Za ugradnju je odabrana cijevna spojnica s BW navarnim priključkom prikazana na slici 9. Bitnije geometrijske veličine prikazane su na slici 10.



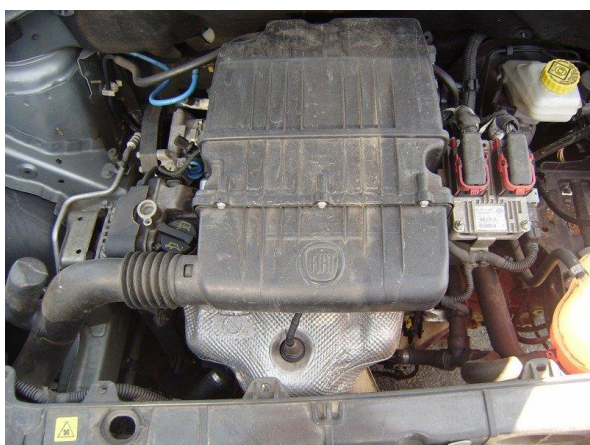
Slika 9. Tehnička dokumentacija Hermeto spojnice korištene za ispitivanje [7]

Kataloški broj	Priključne mjere	Vanjske mjere					
Kat broj	T	D	L	H	Emin	OK1	OK2
CSUP-R-ABW-MI-05	8	1/8"	35	27	5,1	16	15

Slika 10. Dimenzije Hermeto spojnice korištene za mjerenje [7]

3.2.2. Mjesto postavljanja spojnice

Mjesto postavljanja spojnice predstavljalo je problem od samog početka jer vozilo ima ispušnu granu i katalizator napravljen od jednog komada pa je bilo potrebno izrezati granu. Kako ne bi došlo do oštećenja vozila, originalna grana je zamijenjena. Na zamijenjenoj grani su rađene preinake.



Slika 11. Lijevo: Smještaj originalne ispušne grane FIAT-a Punta; Desno: Ispušne cijevi i katalizator

Spojница je postavljena na sam vrh ispušne grane gdje su već spojene sve struje ispušnih plinova kako bi bilo omogućeno mjerenje ispušnih plinova svih cilindara te da je najlakši daljnji pristup.

Također, na ovaj se način najmanje smetalo radu lambda sonde. Nakon zamjene grane, stavljen je čep kako bi se vozilo moglo sigurno voziti.

3.3. Mjerni uređaji

3.3.1. Valjci za mjerenje snage vozila

Valjci za mjerenje snage su strojevi koji se koriste pri razvoju, ispitivanju i provjeri tehničkih specifikacija vozila. Ovi strojevi mjere pogonsku silu nastalu na obodu kotača. Promjenom brzine vrtnje ili opterećenja, ovi uređaji mogu mijenjati točke rada motora. Kako se kotači vozila okreću, valjci se počinju okretati na drugu stranu što rezultira time da vozilo stoji. Na ovaj se način pokušavaju simulirati stvarni uvjeti u vožnji. Kako bismo simulirali što točnije uvjete, valjci predstavljaju razna opterećenja u vožnji. Moraju se specificirati određene veličine poput prijenosnog omjera i koeficijenta otpora zraka.

Valjci korišteni za mjerenje su MAHA LPS 3000 prikazana na slici 12. Pomoću njih je moguće simulirati razna opterećenja[8]:

- Konstanta opterećenje vožnje,
- Konstantna brzina,
- Konstantna brzina vrtnje motora,
- Ciklusi vožnji,
- Kočenje.

Također, moguće je izmjeriti maksimalnu snagu motora pomoću njih.



Slika 12. Valjci MAHA LPS 3000

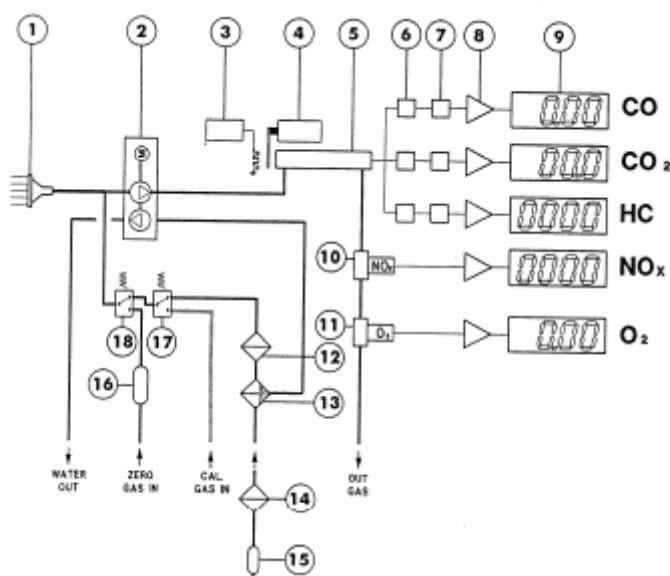
3.3.2. Uređaj za mjerenje štetne emisije

Uređaj korišten za mjerenje je Tecnotest 488. Riječ je o standardnom uređaju korištenom pri ispitivanju za tehnički pregled. Uređaj može mjeriti emisiju [9]:

- Količinski udio ugljikovog monoksida y_{CO} [%vol],
- Količinski udio ugljikovog dioksida y_{CO_2} [%vol],
- Količinski udio kisika y_{O_2} [%vol],
- Količinski udio neizgorjelih ugljikovodika y_{HC} [ppm].

Veličina faktora pretička zraka λ računa se prema sljedećoj jednadžbi [9]:

$$\lambda = \frac{y_{CO_2} + \frac{y_{CO}}{2} + y_{O_2} + \left(\frac{1,7261}{4} \cdot \frac{3,5}{3,5 + \frac{y_{CO}}{y_{CO_2}}} - 0,0088 \right) \cdot (y_{CO_2} + y_{CO})}{\left(1 + \frac{1,7261}{4} - 0,0088 \right) \cdot (y_{CO_2} + y_{CO} + 6 \cdot y_{HC})} \quad (2)$$



Slika 13. Shema uređaja [9]

Slika 13 prikazuje shemu uređaja. Uređaj funkcionira tako što kroz sondu (16) u analizator dolaze ispušni plinovi gdje se odvajaju od vode pomoću filtera. Nakon toga, preusmjereni su u ćeliju za mjerenje (5). Odašiljač (3) odašilje infracrvenu svjetlost preko optičkog filtera (6) na mjerne elemente (7). Ovisno o koncentraciji različitih plinova, ispušni plinovi apsorbiraju svjetlost u različitim valnim spektrima. CO, CO₂ i HC apsorbiraju infracrvenu svjetlost i

emitiraju različite spektre dok H_2 , O_2 i N_2 ne. Razina O_2 mjeri se uz pomoć kemijskog senzora (11).



SECURITY GAS ANALYSIS			
RPM	0850	[1/min]	
CO	1,55	[% vol]	
CO2	12,5	[% vol]	
HC	0250	[ppm vol]	
O2	0,50	[% vol]	
CO EFF	1,00	[% vol]	
LAMBDA	0,999	[-]	
TEMP.	999	[°C]	
DATE	10 / 04 / 06		
TIME	09 : 57		
VEHICLE DATA			
MODEL			
LICENSE PLATE			
CHASSIS			
FOR			
SERVICE			
OFFICINA AUTOMOBILISTA			
BARDI ROM			
VIA G. BARBALESI 10/A			
24100 VERGARA			
42100 PARMA			
EXAMINATOR			

Slika 14. Lijevo: Tecnotest 488; Desno: Primjer ispisanih rezultata [9]

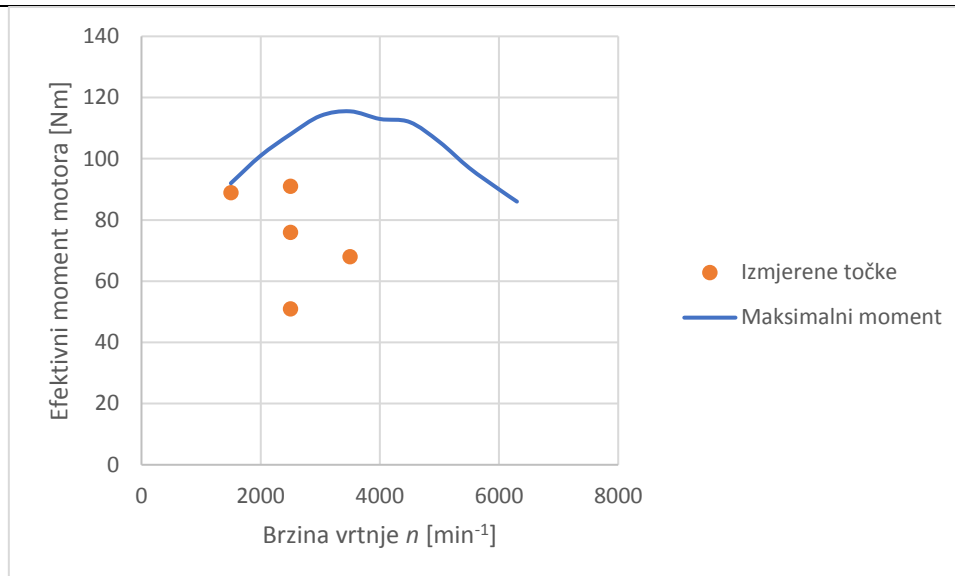
Slika 14, lijevo, prikazuje analizator. Na ekranu analizatora mogu se očitati izmjerene veličine. Također, analizator ispisuje izmjerene vrijednosti u obliku prikazanom na slici 14, desno.

3.4. Eksperimentalno mjerenje

Točke rada odabrane su na način da što bolje pokriju područje rada motora, ali uzimajući u obzir da je riječ o osobnom vozilu s većim brojem kilometara, brzine vrtnje veće od 3500 min^{-1} nisu ulazile u mjerenje da se ne ošteti vozilo. Na valjcima se koristila funkcija konstantne brzine vrtnje, dok se snaga korigirala pritiskom na papučicu gasa.

Do iznosa izmjerenog efektivnog momenta (M_e) došlo se preko snage vozila (P) izmjerene na valjcima te brzine vrtnje motora (n) preko formule:

$$M_e = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} [\text{Nm}]. \quad (3)$$



Slika 15. Mjerne točke prikazane u mapi rada motora

Slika 15 prikazuje mjerne točke u mapi rada motora u programskom paketu Microsoft Office Excel koji će biti korišten za sve rezultate. Mjerenja ispušnih plinova su napravljena na 3 različite brzine vrtnje te na 5 različitih opterećenja. Pri 1500 min^{-1} napravljena je mjerenje pri visokom opterećenju. Pri 2500 min^{-1} napravljena su tri mjerenja, pri niskom, srednjem i visokom opterećenju. Pri 3500 min^{-1} napravljeno je jedno mjerenje pri srednjem opterećenju. Prema slici 16 je vidljivo da je obrađen širok raspon uobičajenog rada motora te je kao takav reprezentativan za cijelo područje rada motora.

Tablica 3. Vrijednosti i nazivi izmjerenih točaka

Naziv točke	Brzina vrtnje n [min^{-1}]	Efektivni moment motora [Nm]
1500 visoko	1500	89,1
2500 nisko	2500	51,5
2500 srednje	2500	76,6
2500 visoko	2500	91,3
3500 nisko	3500	58,6

Tablica 3 prikazuje točne vrijednosti i nazive koji će se koristiti u radu za sve točke.

Ispitivanje se provodilo dana u podružnici Centra za vozila Hrvatske u Velikoj Gorici gdje se nalazi odjel za ispitivanje vozila.

3.4.1. Postavljanje vozila na valjke za mjerenje snage i spajanje na uređaj za mjerenje

Pri postavljanju vozila na valjke za mjerenje snage bilo je potrebno isto učvrstiti kako ne bi *pobjeglo* iz valjaka. Vozila s prednjim pogonom moraju biti pričvršćena s oba kraja vozila zbog bočnog pomaka kao što se vidi sa slike 16.

Prednji pogon

Ako vozilo ima prednji pogon mora biti osigurano s prednje i stražnje strane zbog lateralnog pomaka!



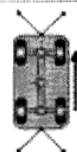
Stražnji pogon

Ako vozilo ima stražnji pogon, mora biti učvršćeno sa stražnje strane!



Pogon na sva 4 kotača

Vozila s pogonom na sva 4 kotača moraju biti učvršćena s prednje i stražnje strane!



Slika 16. Učvršćivanje vozila ovisno o pogonu [8]



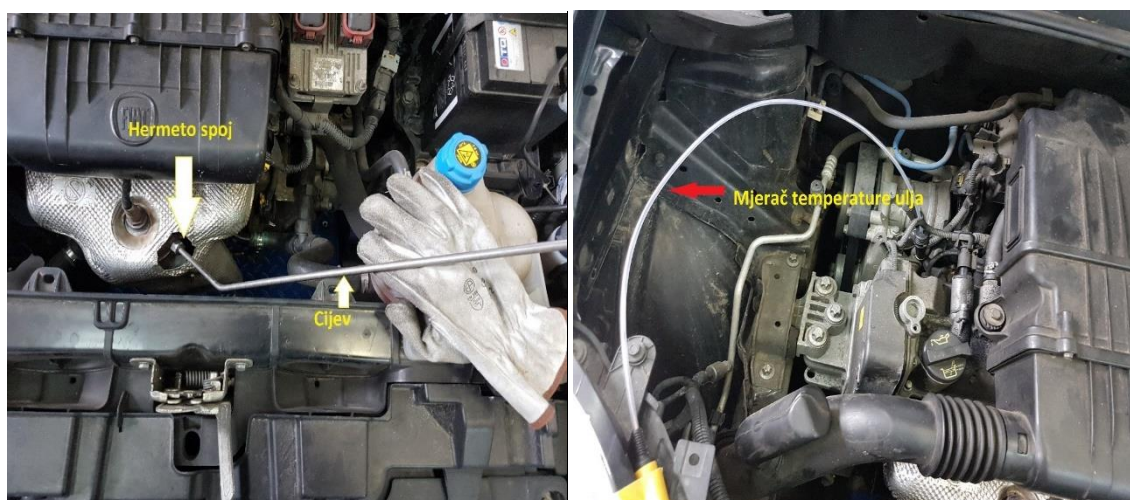
Slika 17. Osiguranje prednjeg kraja vozila od ispadanja iz mjernih valjaka



Slika 18. Osiguranje stražnjeg kraja vozila od ispadanja

Slike 17 i 18. prikazuju kako se steznim trakama provučenim kroz kuke vozilo privezalo i osiguralo s prednjeg i stražnjeg kraja vozila.

Analizator ispušnih plinova spojen je na Hermeto spoj preko čelične cijevi duljine 1800 mm. Cijev služi za smanjenje temperature ispušnih plinova koji bi inače mogli oštetiti analizator. Također, potrebno je analizator spojiti i na spremnik za ulje motora kako bi se kontrolirala temperatura ulja.



Slika 19. Lijevo: Hermeto spoj i cijev; Desno: Mjerač temperature ulja

Slika 19 lijevo prikazuje spoj cijevi s Hermeto priključkom, dok slika 19 desno prikazuje mjerač temperature ulja koji je spojen sa spremnikom ulja kroz provrt za mjerač razine ulja u motoru.



Slika 20. Ispitni postav

Slika 20 prikazuje cijeli ispitni postav zajedno s vozilom, mjernim valjcima i analizatorom.

3.4.2. Mjerenje ispušnih plinova

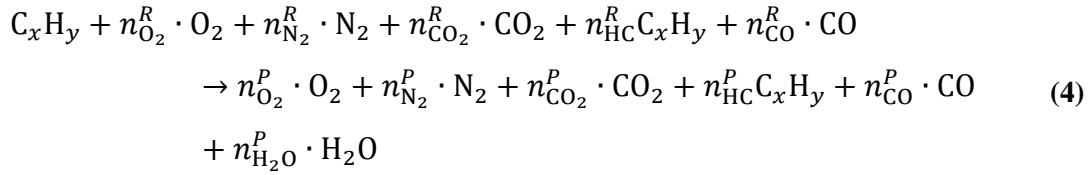
Nakon postavljanja vozila na valjke i osiguranja od bočnog pomaka, napravljena su mjerenja sastava ispušnih plinova. Izmjereni su rezultati prije i nakon katalitičke obrade u dva mjerenja za svih 5 točaka rada. Motor je u oba mjerenja bio u vrlo sličnim uvjetima rada i pri jednakim brzinama vrtnje. Izmjereni su količinski udjeli CO, CO₂, O₂, HC, izmjeren je i faktor pretička zraka prema izrazu (2). Količinski udio NO_x nije bilo moguće izmjeriti ovim analizatorom.

No, kako analizator ispušnih plinova sadrži filter zraka koji izdvaja vodenu iz sastava ispušnih plinova radi mogućeg oštećenja, potrebno je tu istu vodenu paru uračunati u rezultate.

3.4.2.1. Proračun udjela mokrih ispušnih plinova

Kao što je već rečeno, izmjereni rezultati koncentracija štetnih plinova odnose se na takozvane suhe ispušne plinove, odnosno izuzeta je voda iz izmjerenih koncentracija. S obzirom da se zna količina suhih dimnih plinova, nizom jednadžbi moguće je doći do koncentracije mokrih dimnih plinova, tj. stvarne koncentracije ispušnih plinova emitirane iz vozila.

Jednadžbu izgaranja pretpostavljamo na sljedeći način [11]:



Gdje n predstavlja broj molova određenog konstituenta u smjesi, a oznake u natpisu označavaju reaktante i produkte.

Ako se iz mokrih ispušnih plinova izdvoji voda koja se pojavljuje u obliku vodene pare dobiva se smjesa plinova koja se naziva suhi ispušni plinovi. Količinu produkata izgaranja tada možemo napisati na idući način:

$$n_{suhih} = n_{O_2}^P + n_{N_2}^P + n_{CO_2}^P + n_{HC}^P + n_{CO}^P \text{ [mol]}, \quad (5)$$

$$n_{mokrih} = n_{suhih} + n_{H_2O}^P \text{ [mol]}. \quad (6)$$

Pretpostavi li se da znamo koji ugljikovodik nam se nalazi u gorivu, te da imamo izmjerene količine konstituenata u produktima pozivajući se na zakon o očuvanju mase možemo napisati jednadžbu:

$$\frac{X}{Y} = \frac{n_{CO_2}^P + X \cdot n_{HC}^P + n_{CO}^P}{2 \cdot n_{H_2O}^P + Y \cdot n_{HC}^P}. \quad (7)$$

Izlučivanjem dobije se izraz za molnu količinu vode:

$$n_{H_2O}^P = \frac{1}{2} \left(\frac{n_{CO_2}^P + X \cdot n_{HC}^P + n_{CO}^P}{\frac{X}{Y}} - Y \cdot n_{CH}^P \right) \text{ [mol]}. \quad (8)$$

Količinski udjeli definirani su kao omjer količine pojedinih konstituenta u smjesi, odnosno:

$$y_{CO_2}^{suhih} = \frac{n_{CO_2}^P}{n_{suhih}^P} \left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}} \right], \quad (9)$$

$$y_{CO}^{suhih} = \frac{n_{CO}^P}{n_{suhih}^P} \left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}} \right], \quad (10)$$

$$y_{HC}^{suhih} = \frac{n_{HC}^P}{n_{suhih}^P} \left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}} \right]. \quad (11)$$

Zamijene li se količine s količinskim udjelima, dobije se sljedeći izraz za količinski udio vode:

$$y_{H_2O}^{suhih} = \frac{1}{2} \left(\frac{y_{CO_2}^{suhih} + X \cdot y_{HC}^{suhih} + y_{CO}^{suhih}}{\frac{X}{Y}} - Y \cdot y_{HC}^{suhih} \right) \left[\frac{\text{mol}}{\text{mol}} \right]. \quad (12)$$

Dijeljenjem jednadžbe (6) s količinom vode dobije se izraz:

$$\frac{n_{mokrih}}{n_{H_2O}^P} = \frac{n_{suhih}}{n_{H_2O}^P} + 1, \quad (13)$$

što je zapravo recipročna vrijednost količinskog udjela vode u suhim i mokrim ispušnim plinovima pa se može zapisati kao:

$$\frac{1}{y_{H_2O}^{Mokrih}} = \frac{1}{y_{H_2O}^{suhih}} + 1. \quad (14)$$

Daljnjim sređivanjem dobije se izraz za količinski udio vode u mokrim plinovima:

$$y_{H_2O}^{Mokrih} = \frac{y_{H_2O}^{suhih}}{1 + y_{H_2O}^{suhih}}. \quad (15)$$

Ako je poznat količinski udio vode u mokrim plinovima, mogu se odrediti količinski udjeli svih ostalih konstituenata.

Prikaže li se količina na sljedeći način:

$$n_i^P = \frac{n_i^P}{n_{suhih}} n_{suhih}, \quad (16)$$

a izraz (6) kao:

$$\begin{aligned} n_{suhih} &= n_{mokrih} - \frac{n_{H_2O}^P}{n_{mokrih}} n_{mokrih} = n_{mokrih} \left(1 - \frac{n_{H_2O}^P}{n_{mokrih}} \right) \\ &= n_{mokrih} (1 - y_{H_2O}^{Mokrih}), \end{aligned} \quad (17)$$

uvrštavanjem izraza (17) u izraz (16) te dijeljenjem s količinom mokrih plinova, dobiju se sljedeći izraz:

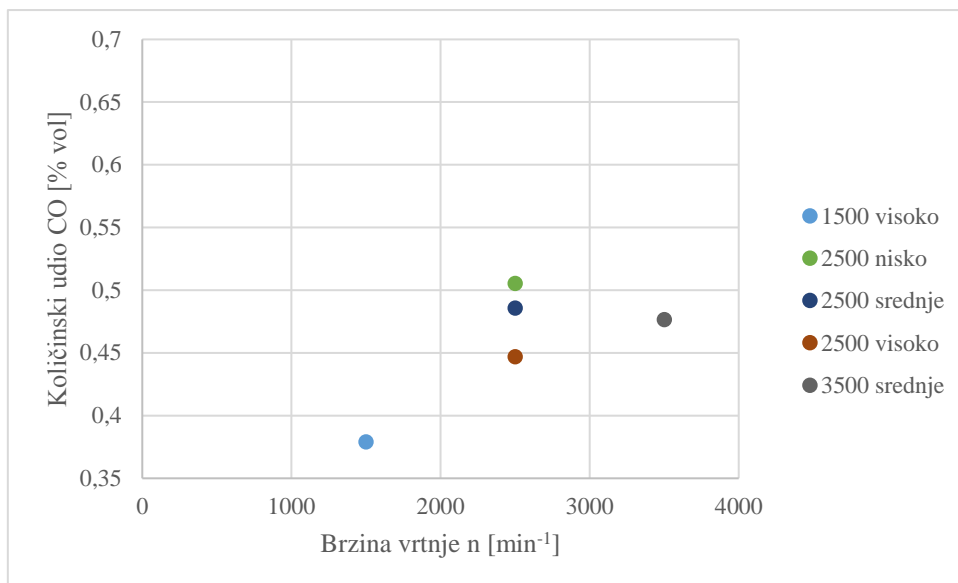
$$n_i^P = \frac{n_i^P}{n_{suhih}} n_{mokrih} (1 - y_{H_2O}^{Mokrih}) /: n_{mokrih} \quad (18)$$

$$\frac{n_i^P}{n_{mokrih}} = \frac{n_i^P}{n_{suhih}} (1 - y_{H_2O}^{Mokrih}) \quad (19)$$

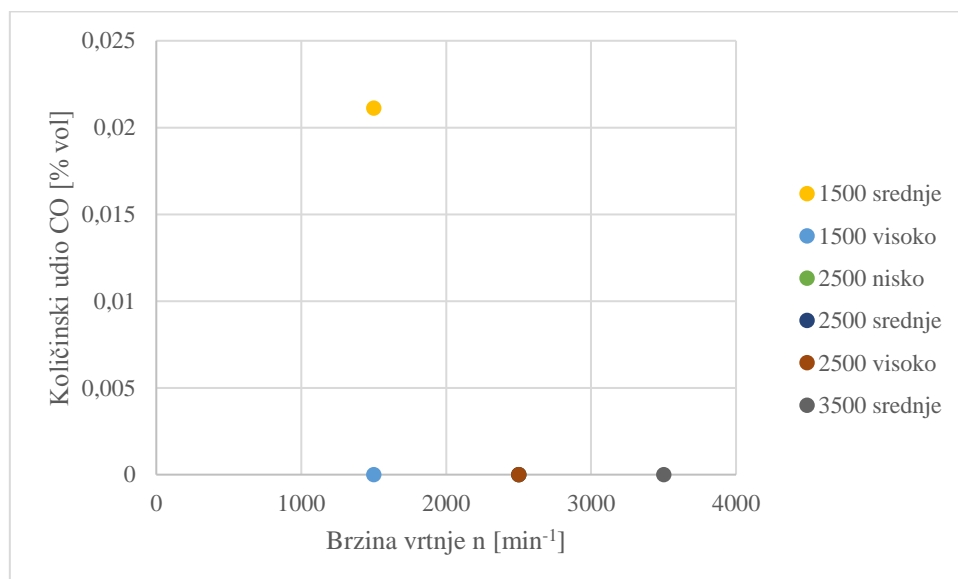
$$y_i^{mokrih} = y_i^{suhih} (1 - y_{H_2O}^{Mokrih}). \quad (20)$$

Izraz (20) koristit će se kako bi se dobila stvarni količinski udio pojedinih ispušnih plinova u smjesi.

3.5. Rezultati dobiveni mjerenjem



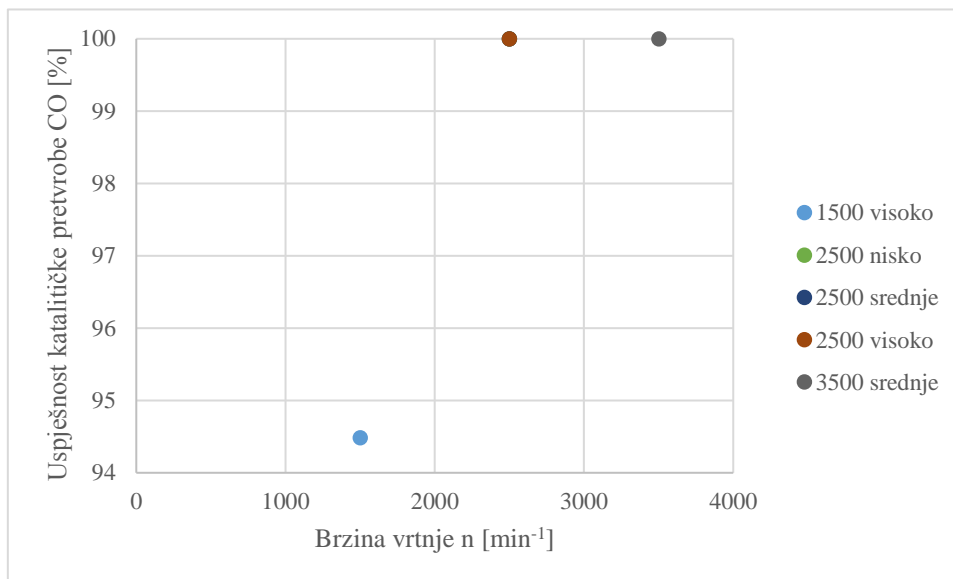
Slika 21. Izmjereni količinski udio CO izmjeren prije katalitičke obrade



Slika 22. Izmjereni količinski udio CO nakon katalitičke obrade

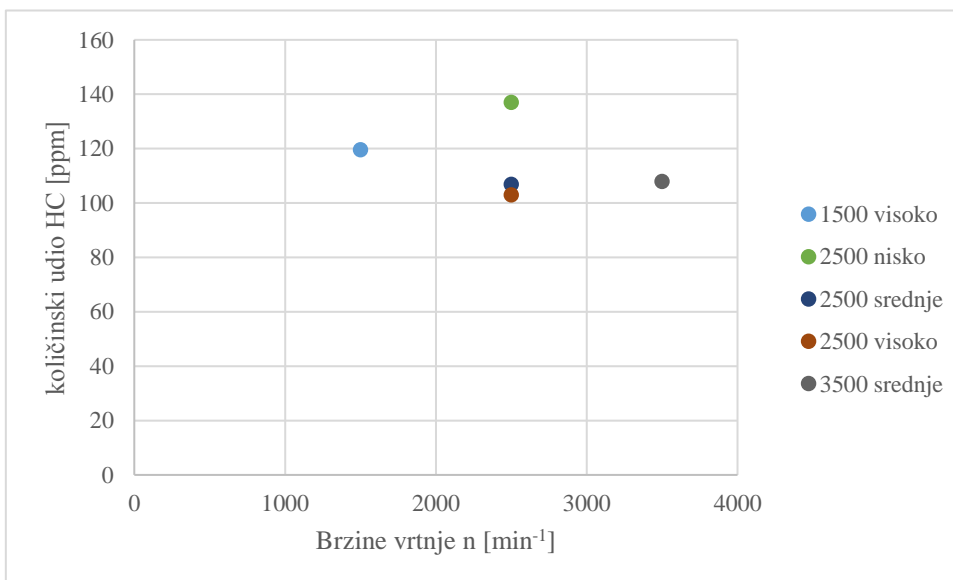
Udio CO u ispušnim plinovima na izlazu iz motora, prikazan na slici 21, veći je s porastom brzine vrtnje i padom opterećenja motora. Prvo se događa zbog smanjenja trajanja izgaranja pa ugljikov monoksid ne stigne odreagirati s kisikom, a drugo zbog manje krajnje temperature koja smanjuje reaktivnost istog. Slika 22 prikazuje količinski udio CO nakon katalitičke obrade. Pri 1500 min^{-1} izmjerena količina CO je približno 0,02 % što je vrlo mali broj, dok za ostale brzine vrtnje analizator nije uopće detektirao CO.

Usporedbom rezultata na slikama 21 i 22, vidljivo je da katalizator uspješno odrađuje katalitičku pretvorbu ugljikovog monoksida za sve izmjerene slučajeve.

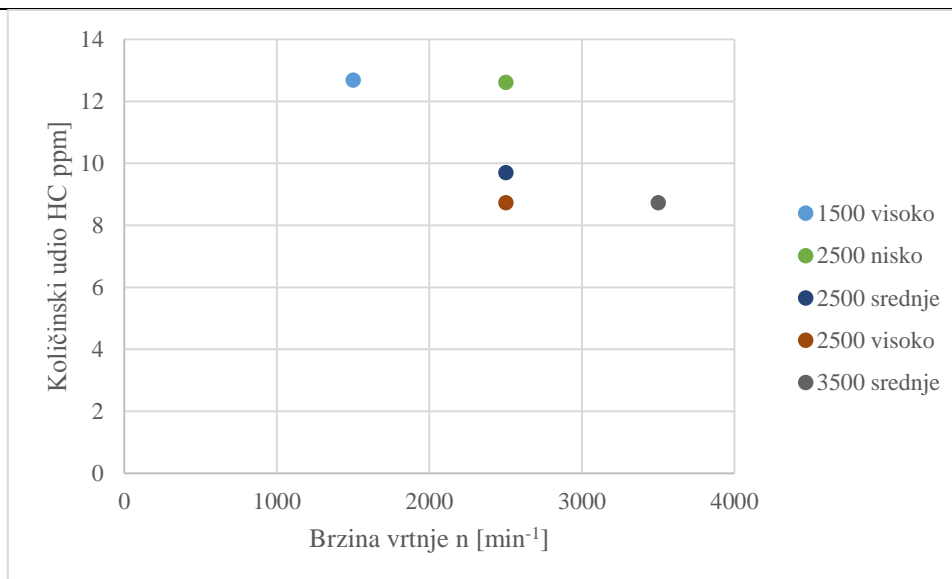


Slika 23. Izračunata uspješnost katalitičke pretvorbe CO

Slika 23 prikazuje izračunatu uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovog monoksida. Pri točki 1500 min⁻¹ visoko uspješnost pretvorbe je između 94 i 95 % dok je pri ostalim točkama 100 %.

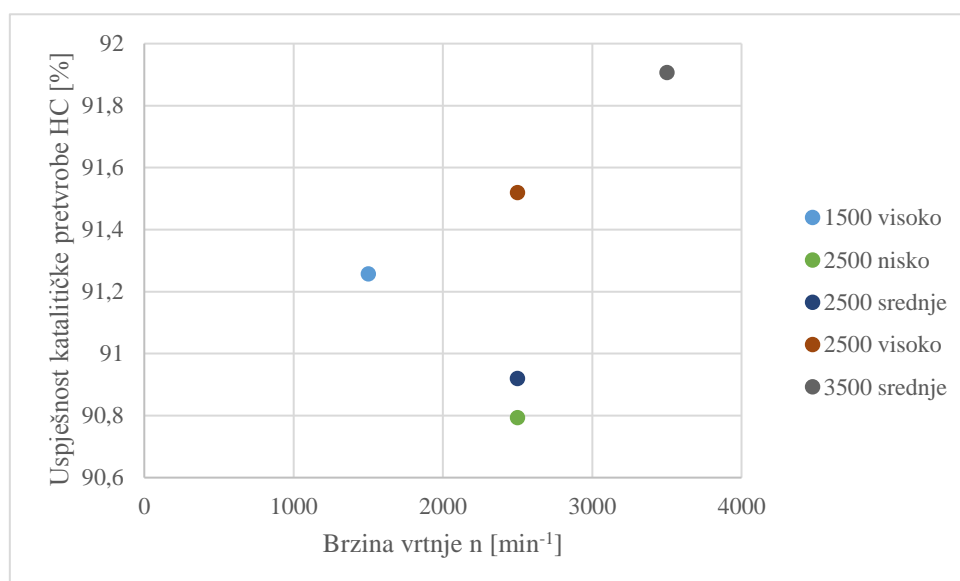


Slika 24. Izmjereni količinski udio HC prije katalitičke obrade



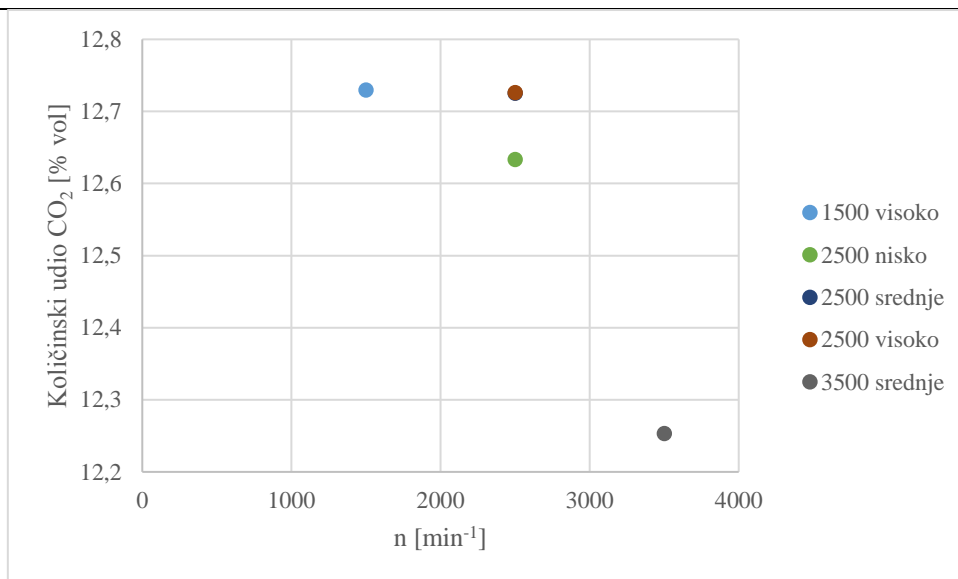
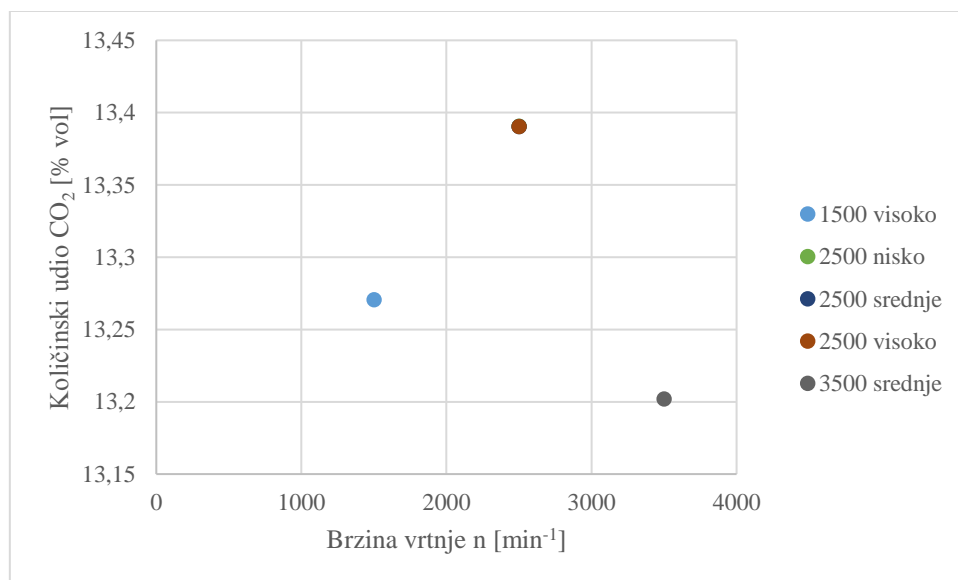
Slika 25. Izmjereni količinski udio HC nakon katalitičke obrade

Slika 24 prikazuje udio HC u smjesi na izlazu iz motora. Kao i u slučaju s CO, padom opterećenja raste udio nereagiralog ugljikovodika u smjesi, dok s porastom brzine vrtnje pada udio. Slika 25 prikazuje udio nakon katalitičke obrade te je vidljivo da dolazi do značajnog smanjenja udjela HC. Najmanji udio HC dobije se za slučajeve 2500 visoko i 3500 srednje.



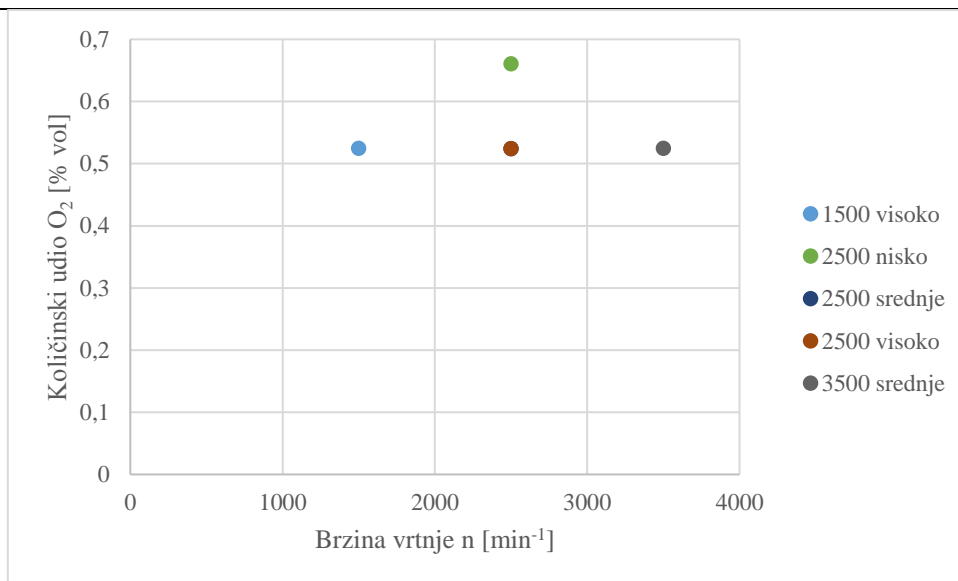
Slika 26. Izračunata uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovodika

Kao i kod ugljikovog monoksida, uspješnost katalitičke pretvorbe je visoka te iznosi iznad 90% za sve slučajeve. Najveća je uspješnost kod točke 3500 srednje kad iznosi 91,9 %.

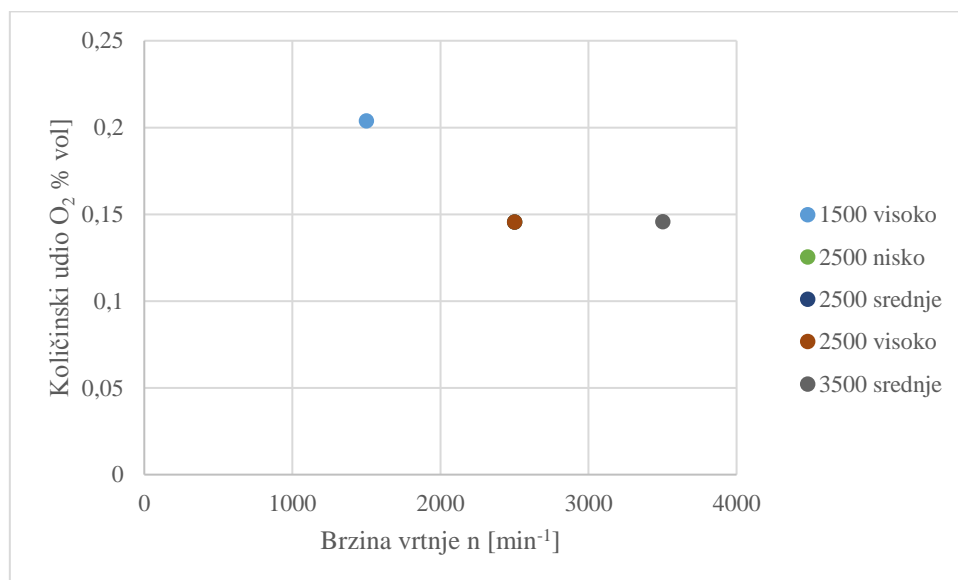
Slika 27. Izmjereni količinski udio CO₂ prije katalitičke obradeSlika 28 Izmjereni količinski udio CO₂ poslije katalitičke obrade

Količinski udio CO₂ prije katalitičke pretvorbe, prikazan na slici 27, iznosi između 12,2 i 12,8 %. Najmanji je kod točke 3500 srednje, a najviši kod točke 1500 visoko.

Kao što je i pretpostavljeno, udio CO₂ nakon katalitičke pretvorbe, prikazan na slici 28, raste jer je došlo do pretvorbe CO i HC u ugljikov dioksid. Najveći izmjereni udio sad iznosi nešto manje od 13,4 % te je dobiven u svim točkama pri brzini vrtnje od 2500 min⁻¹. Udio za točke pri brzini vrtnje od 2500 min⁻¹ veći je nego pri točki pri 1500 zato što se veći udio CO pretvorio u CO₂.

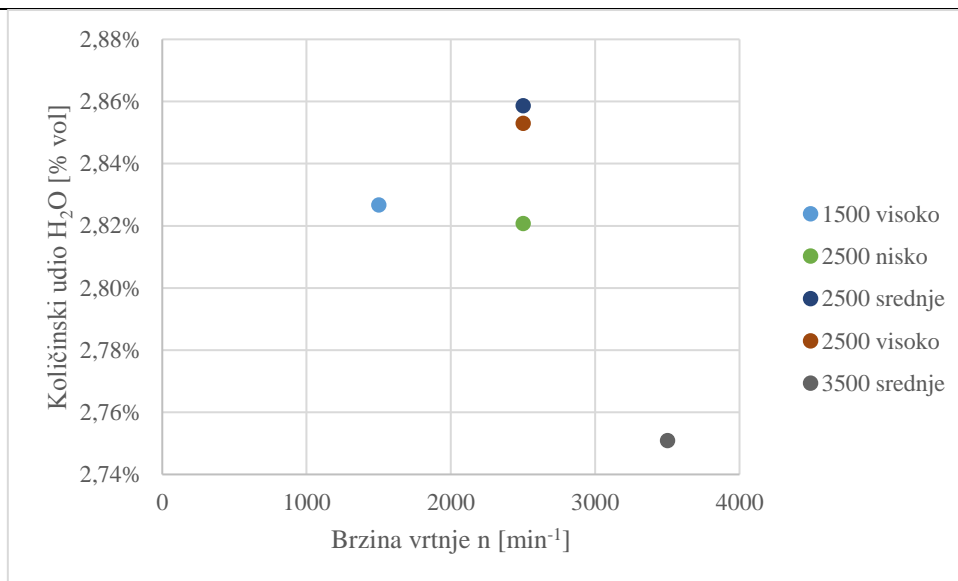


Slika 29. Izmjereni količinski udio O_2 prije katalitičke obrade

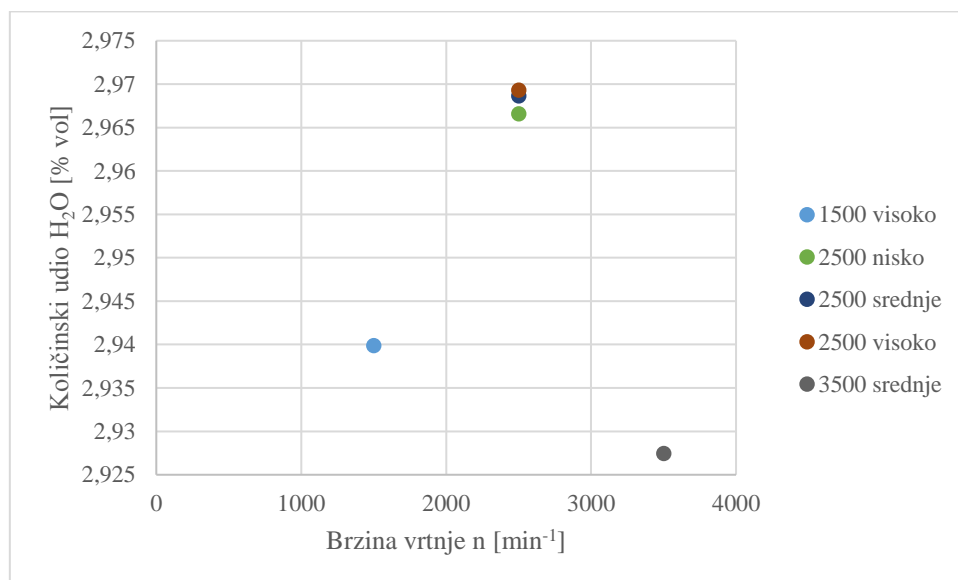


Slika 30. Izmjereni količinski udio O_2 poslije katalitičke obrade

Udio kisika na izlazu iz motora, prikazan na slici 29, najveći je pri najnižem izmjenom opterećenju pri 2500 nisko te iznosi gotovo 0,7 %, dok kod ostalih rezultata nema velikih odstupanja te iznosi oko 0,53%. Nakon katalitičke obrade, što prikazuje slika 30, količinski udio kisika je najmanji kod točke 1500 srednje, a najveći za veće opterećenje pri istoj brzini vrtnje. Smanjenje količinskog udjela je očekivano jer kisik sudjeluje u reakcijama u katalizatoru gdje se veže s ugljikom i vodikom.

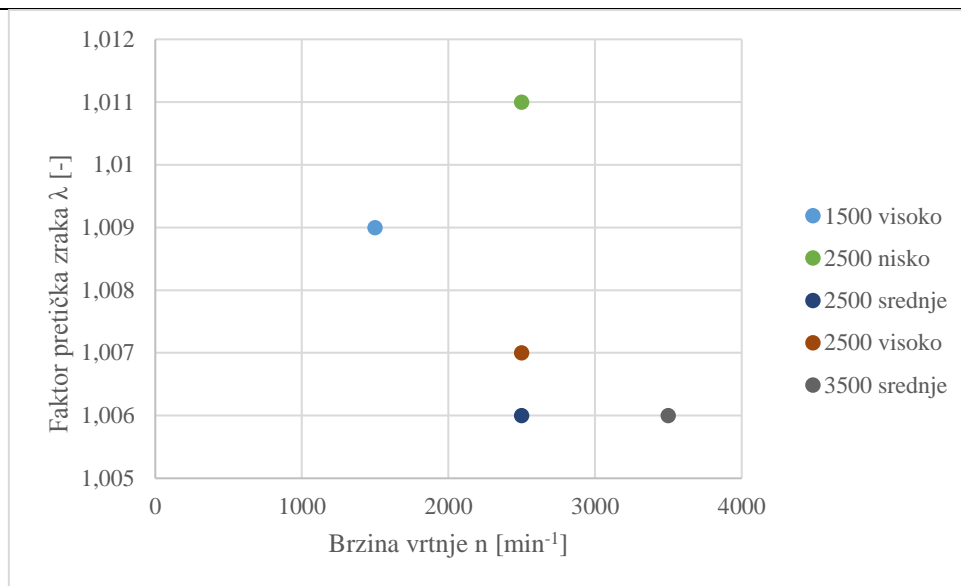


Slika 31. Izračunati količinski udio H₂O prije katalitičke obrade



Slika 32. Izračunati količinski udio H₂O poslije katalitičke obrade

Udio vode na izlazu iz motora, prikazan na slici 31 najveći je kod točke 2500 srednje, a najmanji kod točke 3500 srednje. Udio nakon katalitičke obrade, prikazan na slici 32, veći je za sve slučajeve jer vodik iz ugljikovodika reagira s kisikom u katalizatoru. Najviši iznos je kod točke 2500 visoko te iznosi oko 2,97 %.



Slika 33. Faktor pretička zraka ispred katalizatora

Slika 33 prikazuje faktor pretička zraka ispred katalizatora. S obzirom da su vrijednosti blizu stehiometrijske smjese, to je dokaz da lambda sonda dobro radi.

4. STRATEGIJA I REZULTATI SIMULACIJA

4.1. Programski paket AVL Boost

Programski paket korišten u svrhu ove analize je AVL Boost koji može simulirati rad motora, kemijske reakcije prilikom obrade ispušnih plinova te akustičke značajke. Programski paket AVL Boost vrlo je korišten u automobilske industriji. Program daje precizne rezultate simulacija nevažno o veličini motora, ima li motor prednabijanje te je li riječ o motoru sa stranim izvorom paljenja ili sa samozapaljenjem.

Programski paket sastavljen je od 3 cjeline:

- grafičko radno sučelje,
- glavni proračunski program,
- postprocesorski program.

Grafičko radno sučelje služi za modeliranje motora. Motor se modelira slaganjem elemenata i definiranjem potrebnih veličina. Elementi se dijele na:

- Cilindar,
- Motor (klipni i Wankelov)
- Vozilo,
- Mjerne točke,
- Elementi preuzeti iz drugih programskih paketa
- Cijevi,
- Elementi vanjskih uvjeta (ciklusa rada motora, obrade ispušnih plinova i akustičkih),
- Elementi protoka,
- Elementi volumena,
- Sklopljeni elementi,
- Elementi nabijanja,
- Elementi povezani s drugim programskim paketima,
- Kontrolni elementi
- Elementi za akustiku.

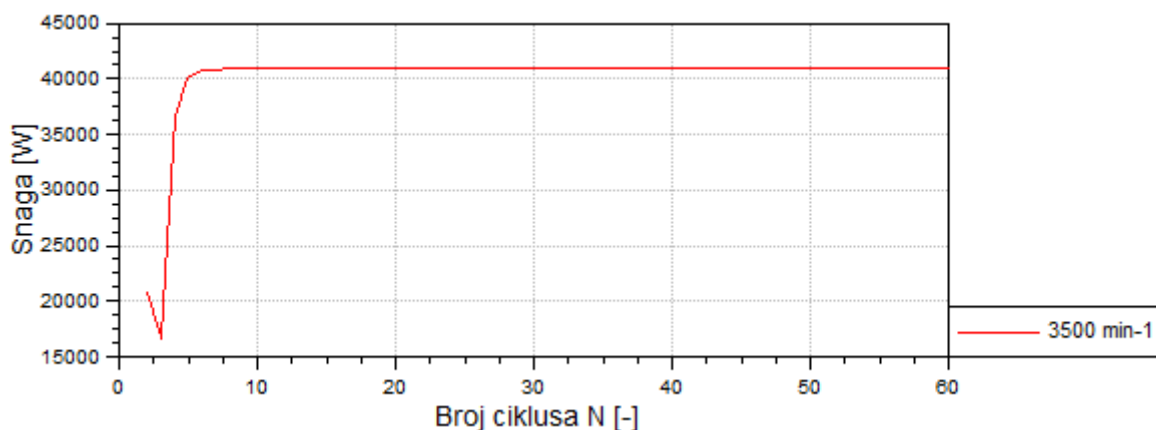
Grafički model pretvara se u matematički model pomoću glavnog proračunskog programa te se simulira rad motora. Program koristi jednodimenzionalnu (1-D) analizu strujanja fluida kroz cijevi koja rješavajući formule iz dinamike plinova računa veličine tlaka, temperature i brzine strujanja kao srednju vrijednost na poprečnom presjeku. Višedimenzionalno strujanje prikazuje se kao jednodimenzionalno uporabom korekcijskih faktora i koeficijenata. Za procese u cilindru i pri obradi ispušnih plinova koriste se pak bezdimenzijski termodinamički (0-D) ciklusi.

Postprocesorski program Impress Chart služi za analizu i obradu dobivenih rezultata simulacije. Rezultati se dijele na rezultate ciklusa rada motora, rezultate obrade ispušnih plinova te akustičke rezultate. Svaki element modela motora sadrži skup rezultata povezanih s istim. Rezultati ciklusa rada motora dijele se na tranzijentne rezultate (eng. *Transient*) koji prikazuju rezultate koji se odnose na sve simulirane cikluse te rezultate koji se odnose na posljednji simulirani ciklus (eng. *Traces*). Na primjer, ako se kod simulacije rada motora želi prikazati srednji efektivni tlak (eng. *BMEP*), koristi se element motora iz tranzijentnih rezultata. Ako se želi prikazati promjena tlaka u cilindru po kutu zakreta koljenastog vratila, koristi se element motora iz posljednjeg simuliranog ciklusa

4.2. Simulacija ciklusa rada motora

4.2.1. Obrada rezultata dobivenih u programskom paketu Boost

I kad je riječ o simulacijama rada motora i obrade ispušnih plinova, neophodno je rezultate dobivene u programu Boost obraditi u postprocesorskom programu Impress Chart. Na primjeru snage dobivene na 3500 min^{-1} bit će prikazan način obrade svih rezultata dobivenih simulacijama.



Slika 34. Konvergencija snage pri 3500 min^{-1}

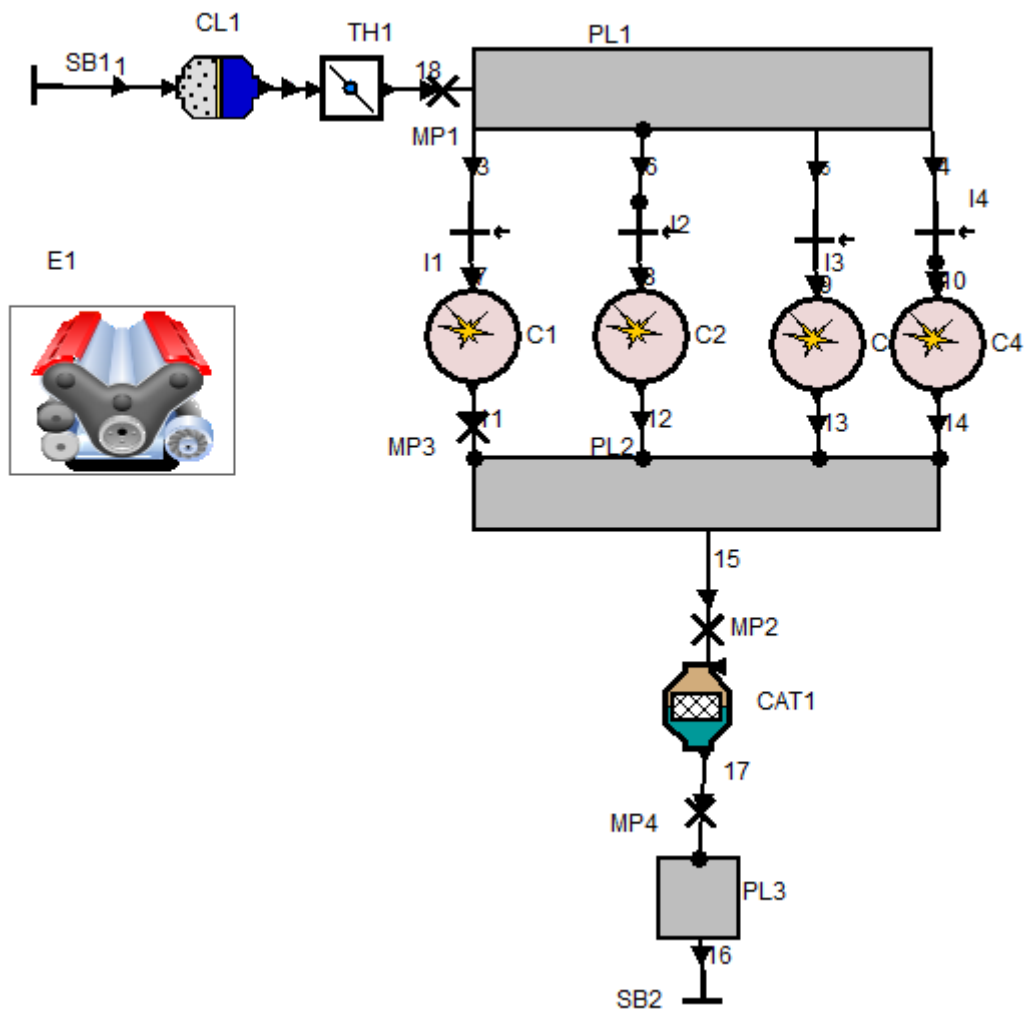
Rezultati dobiveni simulacijom neophodno moraju konvergirati što se i vidi sa slike 34 jer je snaga dobivena simulacijom bez velikih oscilacija. Nakon osrednjavanja vrijednosti snage za posljednjih 30 ciklusa, rezultati su izvezeni u programski paket Microsoft Office Excel.

4.2.2. Model ciklusa rada motora

Proračunski model za simulaciju rada motora služi za dobivanje vrijednosti temperature i tlaka na ulazu i izlazu iz katalizatora potrebnih za vanjske uvjete obrade ispušnih plinova. Shema, prikazana na slici 35, se sastoji od ulaznog vanjskog uvjeta (SB1), cijevi, filtra zraka (AF1), zaklopke (TH1), plenuma prije ulaska u cilindar (PL1), 4 brizgaljke (I), 4 cilindra ©, plenuma nakon cilindra (PL2), katalizatora (C11), ispušnog lonca (PL3), izlaznog vanjskog uvjeta (SB2) te mjerne točke (MP). Mjerenjem, procjenom te vrijednostima dobivenim od strane proizvođača definirani su svi elementi motora.

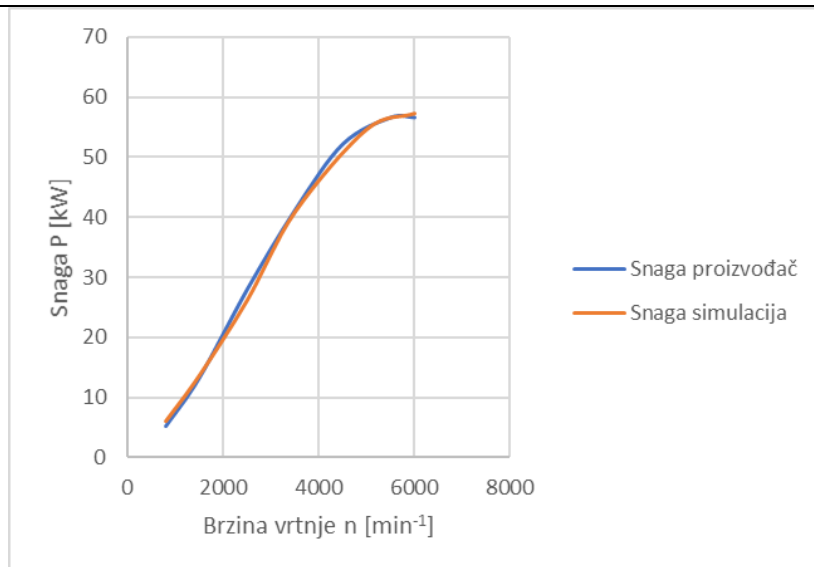
Za model izgaranja izabran je dvozonski Vibe u nedostatku točnih podataka proizvođača, no rezultati dobiveni ovom metodom relativno dobro opisuju procese u motoru. Model izgaranja je opisan pomoću kuta početka izgaranja (α_p), duljine izgaranja ($\Delta\alpha$), parametra potpunosti izgaranja a , te parametra oblika izgaranja m [13]. Dvozonski Vibe omogućuje provjeru detonatnog izgaranja.

Model katalizatora za simulaciju ciklusa rada motora opisan je volumenom monolita, duljinom monolita volumenom ulaznog i izlaznog dijela. Za model trenja, korišten je model s koeficijentima te su zadržane standardne vrijednosti.



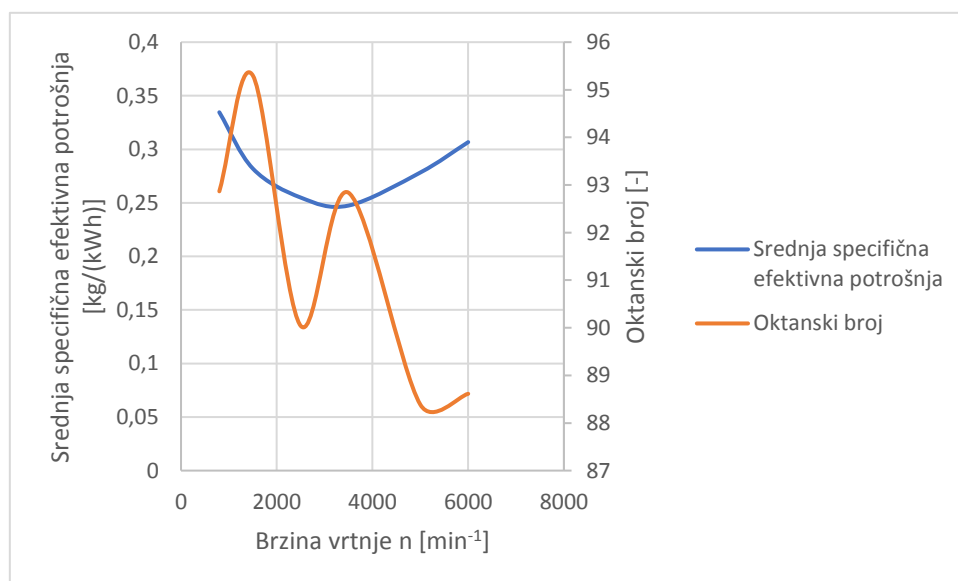
Slika 35. Shema modela za simulaciju rada motora

Cilj simulacije ciklusa rada motora bio je dobiti potrebne tlakove i temperature na ulazu i izlazu u katalizator za 6 točki koje predstavljaju izmjerene točke prikazane na slici 15. No, da bi to bilo moguće prvo je bilo potrebno napraviti poklapanje krivulje snage s mapom rada motora danom od strane proizvođača. Kako bi parametri modela izgaranja koji su korišteni pri dobivanju snage bili valjani, ne smije doći do detonantnog izgaranja u cilindru što će se provjeriti potrebnim oktanskim broj goriva pri izgaranju. Također, vrijednosti srednje specifične efektivne potrošnje moraju biti u skladu s literaturom.



Slika 36. Poklapanje snage dane od strane proizvođača i dobivene simulacijom

Slika 36 prikazuje poklapanje snage dane od strane proizvođača i dobivene simulacijom. Vidljivo je da se krivulje vrlo dobro poklapaju, uzevši u obzir nedostatak ulaznih podataka.



Slika 37. Simulirana srednja specifična efektivna potrošnja i potreban oktanski broj goriva

Slika 37 prikazuje da je najveći oktanski broj potreban za izgaranje bez detonacija nešto veći od 95 pa, iako je granično, neće doći do detonantnog izgaranja. Također, slika 37 prikazuje i srednju specifičnu potrošnju goriva (eng. *BSFC*) koja u najboljoj točki rada iznosi oko 0,25 kg/(kWh) što je u skladu s literaturom.

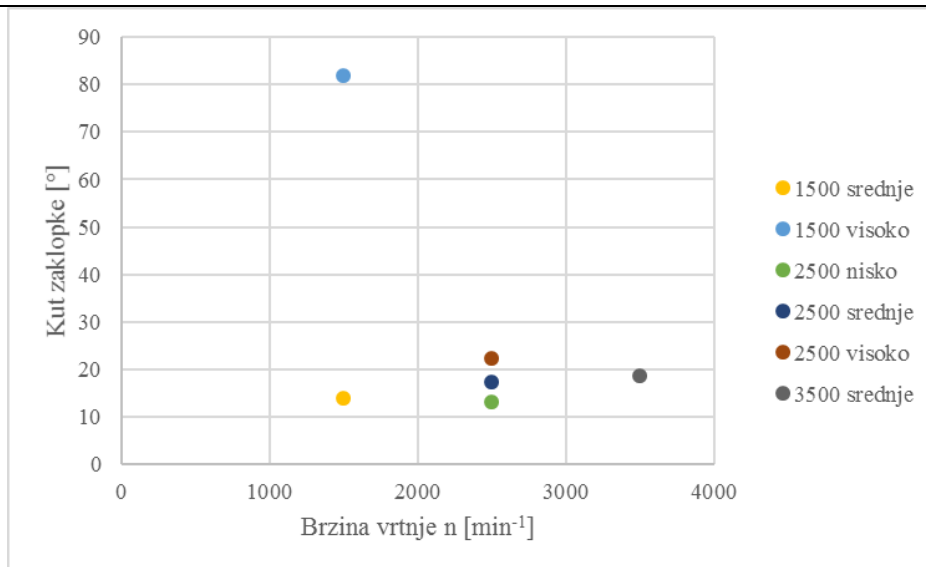
Tablica 4. Vrijednosti Vibeovih parametra korištenih kod izgaranja pri punom opterećenju

Brzina vrtnje [min^{-1}]	$m[-]$	$\Delta\alpha [^\circ]$	$\alpha_p [^\circ]$
800	2,38	59	718
1500	2,3	60	709
2500	2,2	61,4	705
3500	2,08	62,8	700
5000	1,9	65	698
6000	1,81	66,4	695

Tablica 4 prikazuje vrijednosti Vibeovih parametara korištene pri punom opterećenju. Vrijednost oblika izgaranja m te duljine izgaranja $\Delta\alpha$ uzete su u skladu s literaturom [13], dok se vrijednost kuta početka izgaranja α_p mijenjala tako da se dobiju što točniji rezultati za snagu. Valja napomenuti da su vrijednosti Vibeovih parametara uzete kao konstante po opterećenju, odnosno da se mijenjaju samo s brzinom vrtnje.

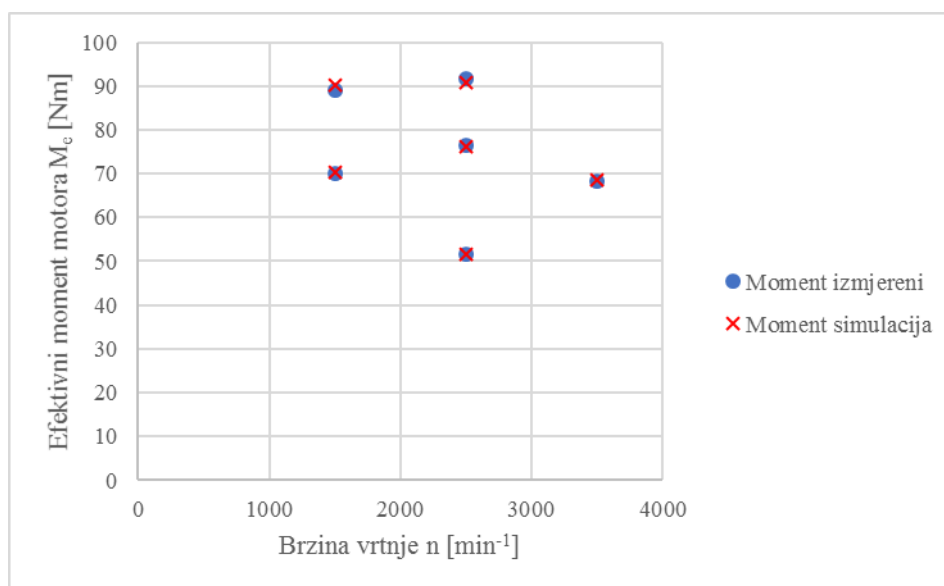
4.2.3. Vrijednosti potrebne za simulaciju obrade ispušnih plinova

Nakon validacije modela slijedila je definicija točki rada koje predstavljaju izmjerene radne točke. To je postignuto korištenjem funkcije upravljanja srednjim efektivnim tlakom (eng. *BMEP control*), odnosno kontroliranjem iznosa srednjeg efektivnog tlaka. Naime, upravljanjem kutom otvorenosti zaklopke, može se postići željeni protok pa posljedično željeni iznos srednjeg efektivnog tlaka i naposljetku snage.



Slika 38. Kut otvorenosti zaklopke ovisno o brzini vrtnje i opterećenju

Slika 38 prikazuje promjenu kuta otvorenosti zaklopke za sve izmjerene točke u ovisnosti o brzini vrtnje (x-os), a različite točke predstavljaju različita opterećenja. Tako je otvorenost zaklopke za visoko opterećenje pri 1500 min^{-1} oko 82° što je gotovo potpuno otvaranje.



Slika 39. Poklapanje izmjerenog i simuliranog momenta

Ovakvi kutovi otvorenosti zaklopke daju vrlo dobro poklapanje izmjerenog i simuliranog momenta što prikazuje slika 39. S obzirom da su rezultati gotovo identični, a nedostatak uređaja potrebnih za eksperimentalno mjerenje vrijednosti masenog protoka u katalizatoru (Q_{MP2}), temperature (T_u) i tlaka (p_u) na ulazu u katalizator i vrijednosti tlaka na izlazu iz katalizatora (p_i), vrijednosti dobivene simulacijom rada motora koriste se kao referentni podaci za simulaciju obrade ispušnih plinova. Podaci su dani u tablici 5:

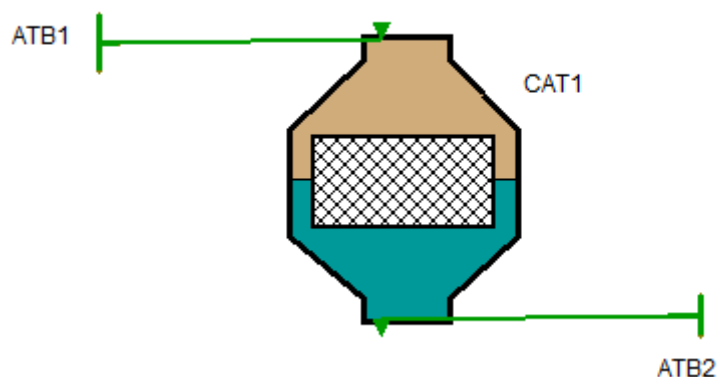
Tablica 5. Vrijednosti potrebne za simulaciju obrade ispušnih plinova

Naziv točke	Q_{MP2} [kg/s]	T_u [K]	p_u [bar]	p_i [bar]
1500 visoko	0,0164	998	1,023	1,022
2500 nisko	0,0172	998	1,004	1,003
2500 srednje	0,0229	1031	1,007	1,007
2500 visoko	0,0264	1049	1,010	1,009
3500 srednje	0,0291	1004	1,033	1,031

Očekivano, porastom brzine vrtnje i opterećenja, raste maseni protok Q_{MP2} . Temperatura na ulazu u katalizator T_u također raste s povećanjem opterećenja za konstantne brzine vrtnje. Tlak na ulazu u katalizator p_u iznosi slično kao i atmosferski, dok se tlak na izlazu iz katalizatora p_i smanjuje za malu vrijednost uslijed trenja u katalizatoru.

4.3. Simulacija obrade ispušnih plinova

4.3.1. Model obrade ispušnih plinova



Slika 40. Shema modela za obradu ispušnih plinova

Pri izradi modela za obradu ispušnih plinova, nije potrebno imati definiran model cijelog motora, nego samo katalizator (CAT1) i vanjske uvjete obrade ispušnih plinova (ATB1 i ATB2) kao što je i prikazano na slici 40.

Kako bi bilo moguće simulirati obradu ispušnih plinova, na padajućem izborniku „Simulacija“ (eng. *Simulation*) treba otvoriti prozor „Upravljanje“ (eng. *Control*) kao i kod simulacije rada motora. Nakon otvaranja prozora i odabira kućice „Obrada ispušnih plinova“ (eng..

Aftertreatment) na opciji „Zadatak simulacije“ (eng. *Simulation task*), mora se definirati „Simulacijski interval“ (eng. *Simulation Interval*) te „Sastav plinova“ (eng. *Gas composition*) na opciji „Analiza obrade ispušnih plinova“ (eng. *Aftertreatment analysis*).

Simulacijski interval opisan je s početkom analize, trajanjem simulacije, korakom proračuna i ispisom rezultata nakon određenog broja koraka. Za početak simulacije uzeto je vrijeme 0, za trajanje simulacije 150 s jer je to vrijeme potrebno za konvergenciju svih veličina. Po preporuci AVL-a [14], korak simulacije mora biti takav da je napravljeno minimalno 30 proračuna kako se ne bi dobile skokovite promjene pa je za korak simulacije odabrano 2 s, a rezultati se ispisuju nakon svakog koraka.

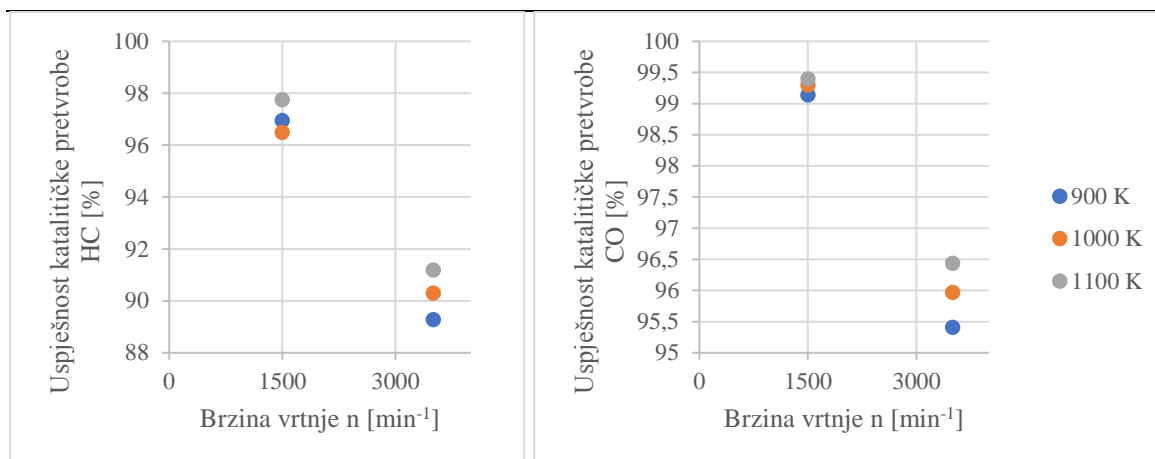
Sastav plinova mora moći opisati sve reakcije koje se odvijaju u simulaciji. Za ovaj rad odabrano je 9 različitih plinova:

- a) Voda (H_2O),
- b) Kisik (O_2),
- c) Vodik (H_2),
- d) Ugljikov monoksid (CO),
- e) Propen (C_3H_6),
- f) Dušik (N_2),
- g) Dušikov (I) oksid (NO),
- h) Ugljikov dioksid (CO_2),
- i) Dušikov (II) oksid (NO_2).

4.3.2. Vanjski uvjeti

Vanjski uvjet na ulazu ATB1 mora se prvo definirati s temperaturom i tlakom, zatim se mora definirati masenim ili volumnim protokom ispušnih plinova te se naposljetku definira udio, u ovom slučaju količinski, plinova koji su na ulazu.

Važno je naglasiti utjecaj temperature na uspješnost katalitičke pretvorbe s obzirom na činjenicu da se njezin točan iznos ne zna.

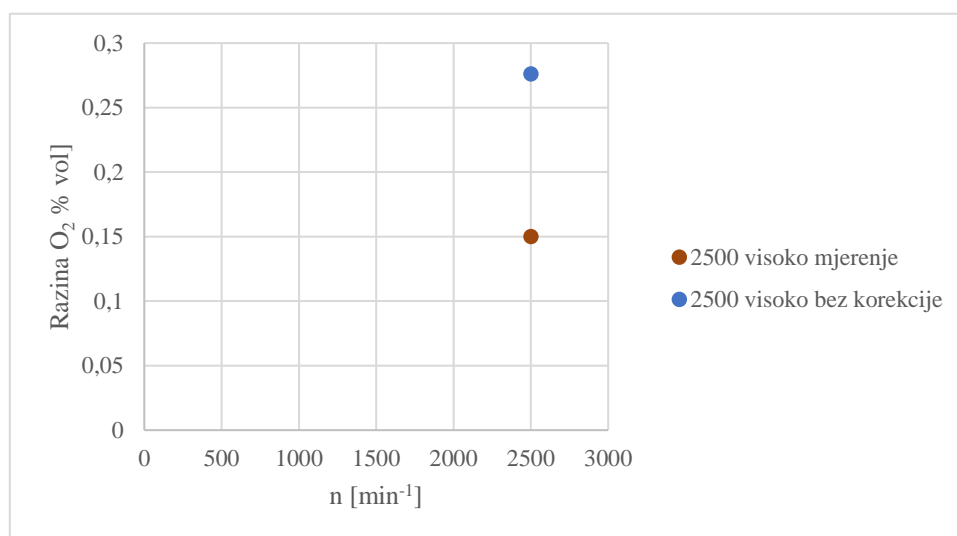


Slika 41. Utjecaj temperature na uspješnost katalitičke obrade HC i CO

Slika 41 prikazuje utjecaj temperature na uspješnost katalitičke pretvorbe HC i CO za točke 1500 visoko i 3500 srednje koje ujedno imaju i najveću razliku u masenim protocima pri temperaturama od 900, 1000 i 1100 K. Porastom temperature, raste i uspješnost katalitičke obrade HC i CO. Porast je značajniji pri većem masenom protoku za oba plina, dok je utjecaj temperature značajniji za katalitičku pretvorbu HC.

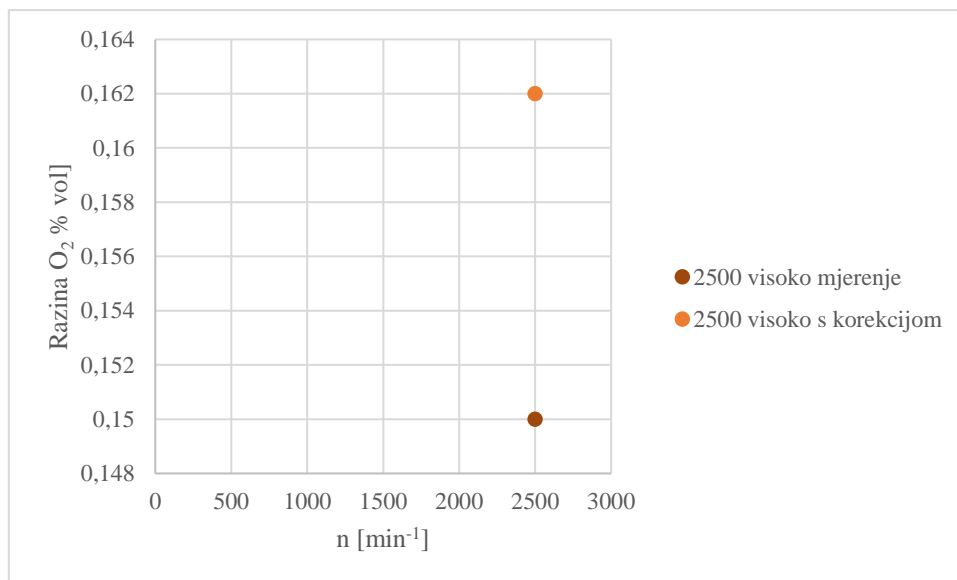
Temperatura, tlak i maseni protok prikazani su u tablici 5.

Za količinske udjele plinova koristile su se vrijednosti dobivene mjerenjem ispred katalizatora uz korekciju količine ugljikovodika te dodatak NO_x koji nisu mogli biti izmjereni. Korekcija količine ugljikovodika je uvedena iz razloga što se izmjereni rezultati znatno razlikuju od onih navedenih u literaturi. S obzirom na to da se ne zna kolika je greška mjerenja analizatora, korektivni faktor morao se odrediti na drugi način.



Slika 42. Količinski udio kisika nakon katalitičke obrade bez korektivnog koeficijenta

Pri analizi rezultata dobivenih simulacijama s korištenjem količinskih udjela ugljikovodika bez korektivnog koeficijenta, primijećeno je da je količinski udio kisika za sve točke rada nakon katalitičke obrade znatno veći nego onaj koji je izmjeren. Na slici 42 može se primijetiti da je količinski udio kisika za simuliranu točku (2500 visoko bez korekcije) gotovo dva puta veći nego udio koji je dobiven mjerenjem (2500 visoko mjerenje).



Slika 43. Količinski udio kisika nakon katalitičke obrade s korektivnim koeficijentom

No, uvrštavanjem korektivnog koeficijenta količine ugljikovodika k_{HC} , moguće je dobiti znatno preciznije rezultate za količinski udio kisika nakon katalitičke obrade kao što to prikazuje slika 43.

Tako, količinski udio ugljikovodika za vanjski uvjet simulacije je definiran s:

$$y_{HC}^{Simulacije} = y_{HC}^{mokrih} \cdot k_{HC}, \quad (21)$$

Gdje oznaka y_{HC}^{mokrih} predstavlja izmjerenu količinu mokrih ispušnih plinova.

Iznos korektivnog koeficijenta ugljikovodika k_{HC} kojim su dobiveni najprecizniji rezultate za sve točke rada je:

$$k_{HC} = 8 [-]. \quad (22)$$

Također, koristio se i dodatak neizmjerenih NO_x u količinskom udjelu od 2500 ppm čestica prema literaturi [15] i [3].

Tablica 6. Vrijednosti korištene za vanjske uvjete simulacije obrade ispušnih plinova

Naziv točke	H ₂ O [%]	O ₂ [%]	H ₂ [%]	CO [%]	HC [ppm]	N ₂ [%]	NO [ppm]	CO ₂ [%]	N [%]	NO ₂ [ppm]
1500 visoko	2,83	0,52 5	0	0,38	840	83,20 1	2200	12,73	0	300
2500 nisko	2,82	0,66	0	0,5	959	83,04 41	2200	12,63	0	300
2500 srednje	2,86	0,52 4	0	0,48 5	742	83,07 68	2200	12,73	0	300
2500 visoko	2,85	0,52 4	0	0,45	721	83,12 39	2200	12,73	0	300
3500 srednje	2,85	0,52 5	0	0,48	756	83,08 94	2200	12,73	0	300

U tablici 6 prikazane su vrijednosti pojedinih plinova koje su se koristile kod vanjskog uvjeta na ulazu ATB1 u svim simulacijama obrade ispušnih plinova.

Vanjski uvjet na izlazu ATB2 opisan je koristeći funkciju adijabatskog protoka (eng. *Adiabatic Backflow*). Funkcija adijabatskog protoka omogućuje postavljanje vanjskih uvjeta bez znanja količinskog ili masenog sastava ispušnih plinova nakon katalitičke obrade te tako stavlja naglasak na sam opis katalizatora.

4.3.3. Katalizator

Element katalizatora definira se jednako kao i kod simulacije ciklusa rada motora uz dodatak kemijskih reakcija koje otvaraju niz prozora koji se tiču kemijskih reakcija i fizikalnih veličina. Prozori koji se moraju ispuniti odnose se na:

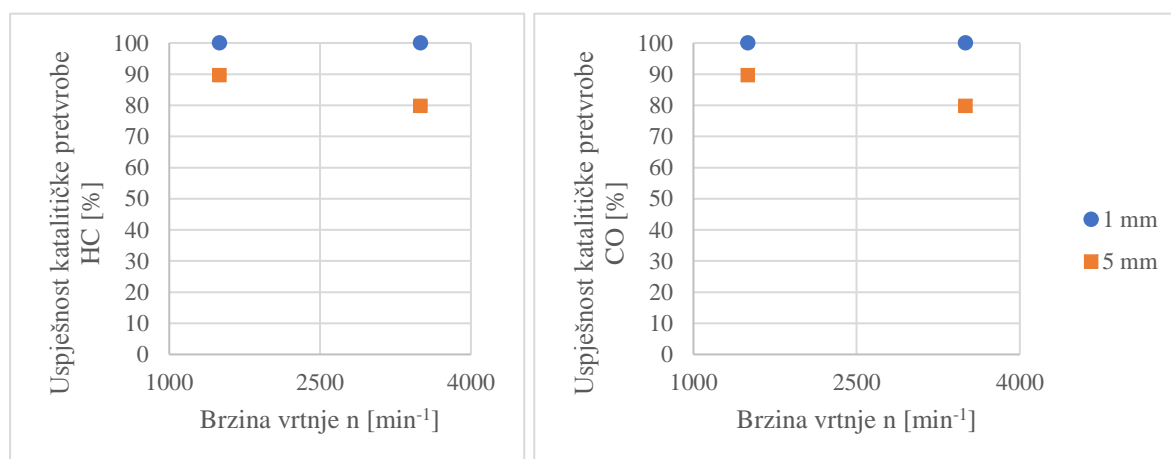
- Početne uvjete (eng. *Initialization*),
- Značajku tipa (eng. *Type Specification*),
- Proračun trenja (eng. *Friction*),
- Diskretizaciju (eng. *Discretization*),
- Fizikalne osobine katalizatora (eng. *Catalyst Physical Properties*),
- Gubitak topline (eng. *Heat Loss*),
- Međusloj (eng. *Washcoat*),
- Način ispisa rezultata (eng. *Resault Specification*).

Početni uvjeti i proračun trenja ostavljeni su jednakim kao i za simulaciju ciklusa rada motora, dok je za način ispisa rezultata korištena opcija ispisa u 5 točaka. Svi ostali prozori opisani su u više detalja u nastavku.

4.3.3.1. Značajka tipa

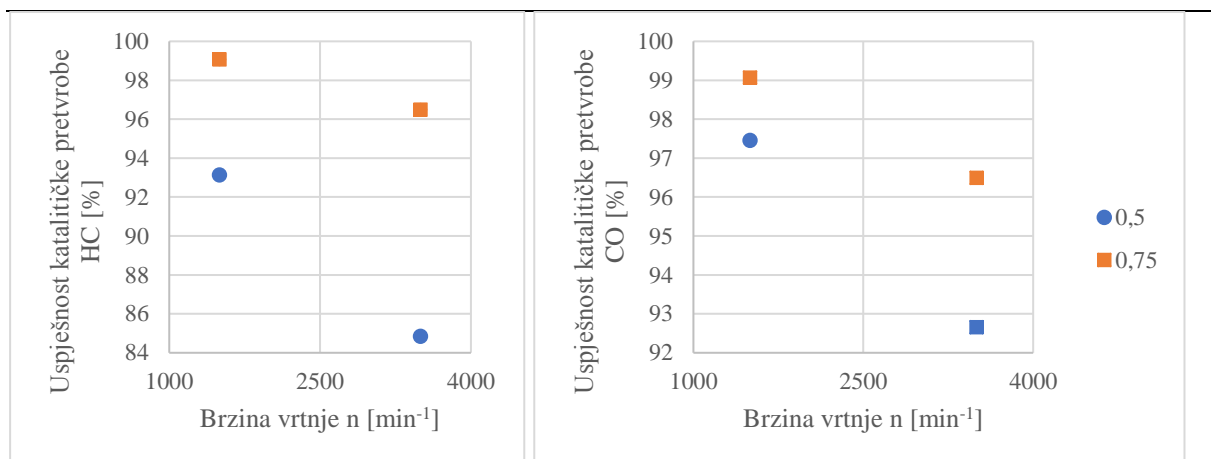
Za tip katalizatora odabran je pojednostavljeni katalizator s kvadratnim ćelijama s obzirom na nedostatak podataka za gustoću ćelija, debljinu zidova i debljine reaktivnog sloja potrebnih za punu verziju. Za pojednostavljeni tip potrebno je odrediti koeficijent volumenskog udjela monolita te hidraulički promjer strujanja između zidova.

Koeficijent volumenskog udjela monolita predstavlja omjer površine monolita kroz cjelokupni presjek katalizatora te iznosi od 0,5 – 0,75 prema [14]. Manji koeficijent volumenskog udjela monolita znači manji broj kanala pa samim tim i manju aktivnu površinu. S obzirom da katalizatori u pravilu imaju pravokutne ćelije kroz koje struje ispušni plinovi, potrebno ih je preračunati u hidraulički promjer strujanja koji iznosi od 1-5 mm prema [14]. Veći hidraulički presjek znači manju gustoću kanala i manju sveukupnu aktivnu površinu.



Slika 44. Utjecaj veličine hidrauličkog promjera na uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovodika (lijevo) i ugljikovog monoksida (desno)

Slika 44 pokazuje utjecaj hidrauličkog promjera na uspješnost katalitičke obrade ugljikovodika, ugljikovog monoksida za točke s najmanjim i najvećim protokom, odnosno točke 1500 visoko i 3500 srednje pri korištenju krajnjih preporučenih vrijednosti, odnosno 1 mm i 5 mm. Porastom hidrauličkog promjera, odnosno smanjenjem gustoće mreže pa samim time i smanjenjem aktivne površine, pada uspješnost katalitičke obrade za sve plinove, s tim da utječe manje na obradu ugljikovog monoksida nego na obradu ugljikovodika. Porastom masenog protoka u katalizatoru, povećava se utjecaj promjene hidrauličkog promjera.



Slika 45. Utjecaj udjela površine monolita na uspješnost katalitičke pretvorbe ugljikovodika (lijevo) i ugljikovog monoksida (desno)

Slika 45 pokazuje utjecaj udjela površine monolita na uspješnost katalitičke obrade ugljikovodika, ugljikovog monoksida i dušikovog oksida za točke 1500 visoko i 3500 srednje za najmanju i najveću preporučenu vrijednost, odnosno 0,5 i 0,75. Porastom udjela površine, povećava se uspješnost katalitičke obrade s tim da je utjecaj veći pri većem protoku. Kao i na prethodnoj Slika 44, manji je utjecaj na uspješnost obrade ugljikovog monoksida, a veći je utjecaj na uspješnost obrade ugljikovodika.

Korištene vrijednosti veličina značajka tipa, prikazane u tablici 7, su u ovoj kombinaciji dale najbolje rezultate simulacija.

Tablica 7. Korištene vrijednosti veličina značajki tipa

Naziv veličine	Vrijednost
Hidraulički promjer	2,93 mm
Udio površine monolita	0,67 [-]

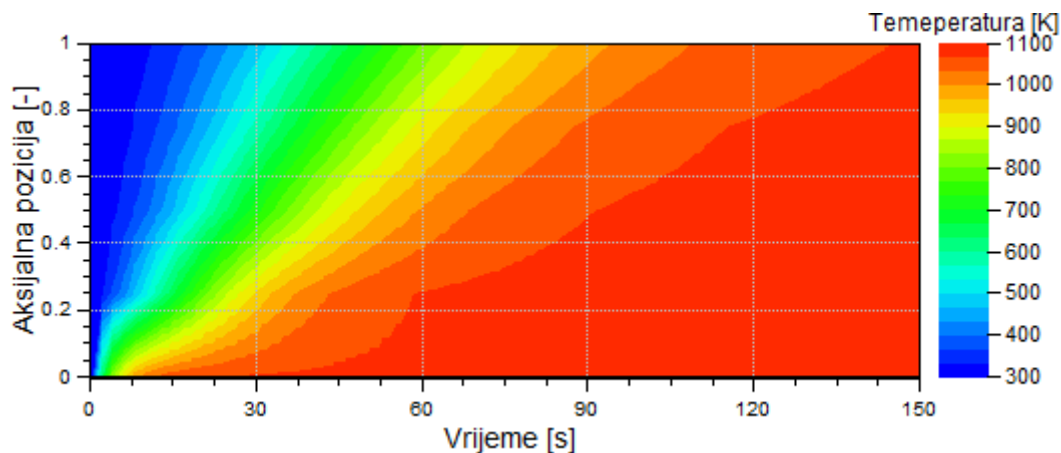
4.3.3.2. Diskretizacija

Moguće je odabrati jednodimenzionalnu koja simulira promjene samo u aksijalnom smjeru i dvodimenzionalnu diskretizaciju koja uzima u obzir i promjene u radijalnom smjeru.

1-D diskretizaciju opisuje se pomoću broja kalkulacijskih ćelija u aksijalnom smjeru i faktorom oblika mreže. Faktor oblika mreže manji od 1 označava mrežu koja je gušća na krajevima monolita dok faktor veći od 1 označava mrežu gušću na sredini.

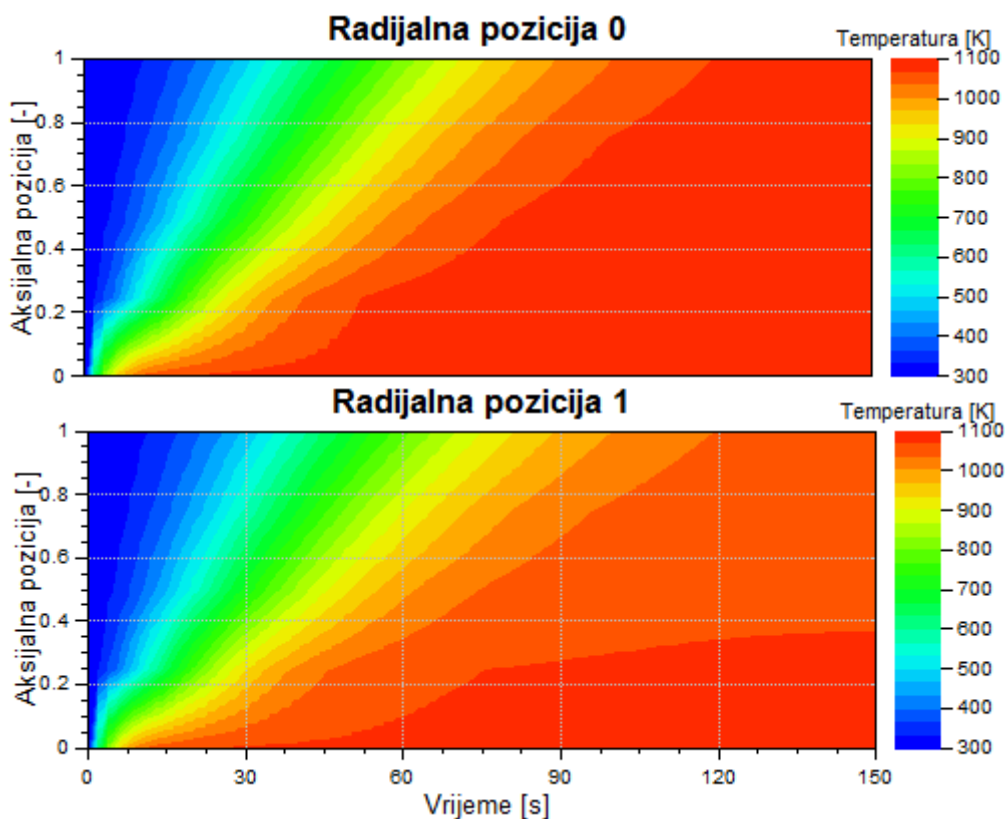
2-D diskretizaciju se dodatno opisuje s brojem kanala u radijalnom smjeru te s faktorom oblika mreže u radijalnom smjeru.

Model diskretizacije praktično ne utječe na krajnje rezultate uspješnosti katalitičke pretvorbe, no utječe na druge parametre poput raspodjele temperature u katalizatoru.



Slika 46. Zagrijavanje monolita katalizatora kod 1-D diskretizacije

Slika 46 prikazuje zagrijavanje monolita katalizatora kod jednodimenzionalne diskretizacije za točku rada 1500 visoko. Na y-osi nalazi se aksijalna pozicija, odnosno udio udaljenosti od početka (vrijednost 0) dužine monolita do kraja (vrijednost 1). Na početku monolita, maksimalna temperatura, otprilike 1071 K, postiže se nakon 30 sekundi dok se maksimalna temperatura od 1067 K na kraju monolita postiže nakon otprilike 140 s.



Slika 47. Zagrijavanje monolita katalizatora kod 2-D diskretizacije za radijalne pozicije 0 i 1

Slika 47 prikazuje zagrijavanje monolita kod dvodimenzionalne diskretizacije za radijalne pozicije 0 i 1 za točku 1500 visoko. Kod radijalne pozicije 0, odnosno u sredini monolita, slično kao i u slučaju 1-D diskretizacije, na početku monolita se postiže maksimalna temperatura od 1080 K nakon cca. 20 s, a na kraju monolita se postiže maksimalna temperatura nakon cca. 115 s. Kod radijalne pozicije 1, odnosno na vanjskom obodu monolita, maksimalna temperatura od 1067 K na početku monolita postiže se nakon cca. 30 s, dok se maksimalna temperatura od 1045 K na kraju monolita postiže nakon cca. 120 s.

S obzirom da simuliranje 2-D diskretizacije traje vremenski neznatno dulje, a omogućuje bolji uvid u procese u katalizatoru, koristit će se 2-D diskretizacija.

Tablica 8. Korištene vrijednosti veličina značajki tipa

Naziv veličine	Vrijednost
Broj kalkulacijskih ćelija u aksijalnom smjeru	20 [-]
Faktor oblika mreže u aksijalnom smjeru	0,8 [-]
Broj kanala u radijalnom smjeru	5
Faktor oblika kanala u radijalnom smjeru	0,5

Tablica 8 navodi korištene vrijednosti koje su ujedno i programom zadane vrijednosti.

4.3.3.3. Fizikalne osobine katalizatora

Fizikalne vrijednosti katalizatora su gustoća, toplinska konduktivnost, specifična toplina i modeli prijenosa mase i topline.

Gustoća materijala odnosi se na gustoću monolita s uračunatim obujmom pora te je preporuka da iznosi od 400-2000 kgm⁻³.

Toplinska konduktivnost materijala monolita može se opisati kao konstanta ili kao funkcija temperature, a preporučene vrijednosti su 0,1-50 W/(mK).

Specifična toplina materijala monolita se također može opisati kao konstanta ili kao funkcija temperature, a iznosi preporuka je da iznosi između 500-2000 J/(kgK).

Prijenos mase i topline može se opisati pomoću preddefiniranih ili korisnikom definiranih modela ili mogu biti konstante.

Tablica 9. Korištene vrijednosti veličina značajki tipa

Naziv veličine	Vrijednost
Gustoća	1700 [kgm ⁻³]
Toplinska konduktivnost	0,8 [W/(mK)]
Specifična toplota	1200 [J/(kgK)]
Prijenos mase i topline	Sieder-Tate

Tablica 9 navodi vrijednosti veličina korištene u radu koje su ujedno i programom zadane vrijednosti jer promjena vrijednosti veličina praktično ne bi donijela razliku uspješnosti katalitičke pretvorbe.

4.3.3.4. Gubitak topline

Simulacije mogu biti adijabatske ili s gubitkom topline. Ako se simulira gubitak topline, model s konstantnom temperaturom stjenke kućišta ili model s promjenjivom temperaturom stjenke kućišta mogu biti odabrani. Gubitak topline definira se preko vrijednosti vanjskog koeficijenta prijelaza topline, debljine i toplinske konduktivnosti zida i izolacije te temperature okoline.

Vanjski koeficijent prijelaza topline odnosi se na prijelaz topline preko kućišta na okolinu te može biti konstantan ili funkcija vremena. Preporučene vrijednosti su između 10 i 100 W/(m²·K).

Preporučena debljina stjenke kućišta je između 1 i 5 mm, dok je vrijednost toplinske konduktivnosti između 10 i 100 W/(m·K).

Preporučena debljina izolacije je između 0 i 30 mm, dok je vrijednost toplinske konduktivnosti između 0,01 i 0,1 W/(m·K).

Tablica 10. Korištene vrijednosti veličina gubitka topline

Naziv veličine	Vrijednost
Vanjski koeficijent prijelaza topline	50 [W/(m ² ·K)]
Toplinska konduktivnost stjenke	50 [W/(mK)]
Debljina stjenke kućišta	3 [mm]
Toplinska konduktivnost izolacije	0,05 [W/(mK)]
Debljina izolacijskog sloja	10 [mm]

Tablica 10 prikazuje korištene vrijednosti veličina odabrane za sve simulacije. Kao i u prethodnom poglavlju, promjena ovih veličina nije znatno utjecala na uspješnost katalitičke pretvorbe.

4.3.3.5. Međusloj

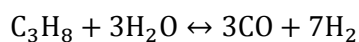
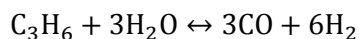
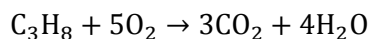
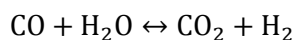
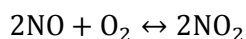
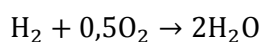
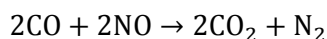
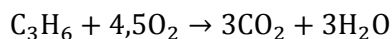
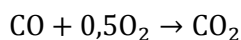
Međusloj određuje vrstu proračuna kod simulacije. Moguće je koristiti model jednoslojnog međusloja u kojem se odvijaju sve reakcije ili je moguće koristiti model s višeslojni u kojima se u pojedinim slojevima odvijaju samo pojedine reakcije. Zbog nedostatka ulaznih podataka potrebnih za definiranje višeslojnog modela, koristit će se jednoslojni model u radu.

Nakon odabira modela međusloja, mora se odabrati model katalizatora. Modeli katalizatora dijele se na:

- Diesellov oksidacijski,
- Trokomponentni,
- SCR sa stabilnim kinetičkim veličinama,
- SCR s tranzijentnim kinetičkim veličinama,
- Apsorpcijski katalizator za NO_x
- Korisnikom definirani u okviru programskog paketa Boosta,
- Korisnikom definirani uvezeni model.

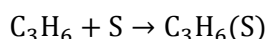
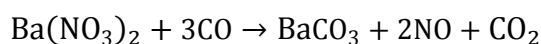
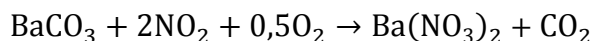
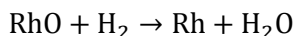
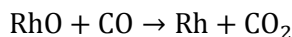
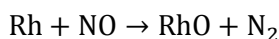
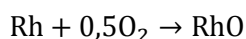
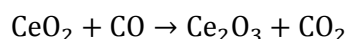
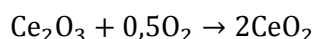
Svaki model ima posebno definirane kemijske reakcije koje se zbivaju u simulacijama. Koristit će se model trokomponentnog katalizatora koji ukupno omogućava korištenje 22 reakcije; 9 osnovnih, 13 reakcija koje objašnjavaju punjenje i pražnjenje površine koja sadrži cerij, rodij i barij te 1 koja predstavlja punjenje metalne površine s ugljikovodikom.

9 osnovnih reakcije odnosi se na oksidaciju i redukciju plinova unutar katalizatora. One glase:



Reakcije oksidacije zbivaju se između O_2 i CO , C_3H_6 , C_3H_8 , H_2 te NO , pa nastaju CO_2 , CO_2 i H_2O te NO_2 . Istodobne reakcije redukcije i oksidacije zbivaju se između CO i NO , CO i H_2O , C_3H_6 i H_2O te C_3H_8 i H_2O pa nastaju CO_2 i N_2 , CO_2 i H_2 te CO i H_2O . Reakcija redukcije je kad se NO_2 raspadne na O_2 i NO .

13 reakcija punjenja i pražnjenja površine odnosi se na reakcije ispušnih plinova i krutina koje su u katalizatoru te glase:



Punjenje površine koja sadrži cerijev (III) oksid (Ce_2O_3) događa se u prisustvu suviška O_2 pa nastaje cerijev (IV) oksid (CeO_2). Pražnjenje površine koja sadrži CeO_2 zbiva u suvišku CO , C_3H_6 i C_3H_8 nakon čega nastaje Ce_2O_3 , CO_2 i H_2O .

Punjenje površine koja sadrži rodij (Rh) događa se u prisustvu suviška O_2 i NO pa nastaje rodijev oksid (RhO) i dušik. Pražnjenje površine koja sadrži RhO događa u suvišku CO , H_2 , C_3H_6 i C_3H_8 pa nastaje Rh , CO_2 i H_2O .

Punjenje površine koja sadrži barijev karbonat ($BaCO_3$) događa se u prisustvu suviška NO_2 i O_2 pa nastaje barijev nitrat ($Ba(NO_3)_2$) i CO_2 . Pražnjenje površine koja sadrži $Ba(NO_3)_2$ zbiva se u suvišku CO pa nastaje $BaCO_3$, NO i CO_2 .

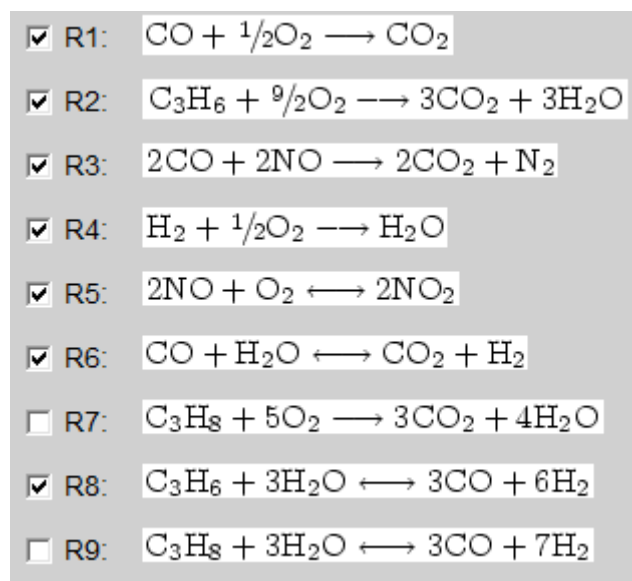
Učestalost zbivanja svih reakcija određena je frekvencijskim faktorima i temperaturama aktivacije, dok se za reakcije elemenata na površini mora još opisati maksimalni molni kapacitet elementa površine te početna i najveća moguća koncentracija elementa na površini.

Frekvencijski faktori i temperature aktivacije korištene u radu ostavljene su kao programskim paketom zadane vrijednosti.

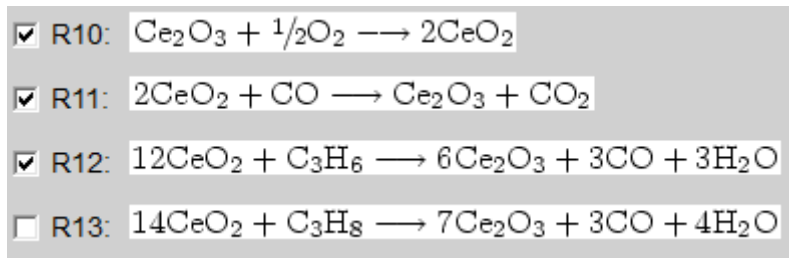
4.4. Rezultati dobiveni simulacijama

Rezultati uspješnosti katalitičke pretvorbe HC, CO i NO_x dobiveni simulacijama bit će prikazani prema modelima s različitim vrstama kemijskih reakcija

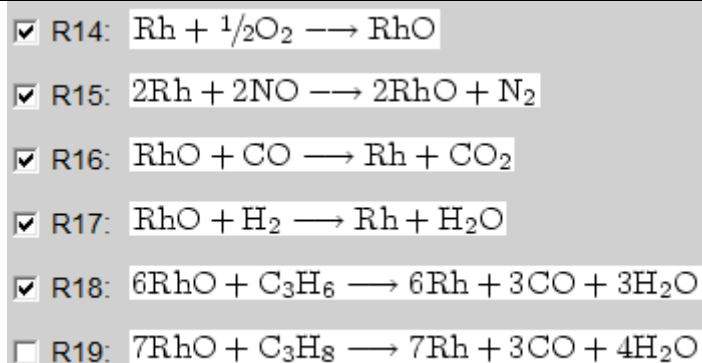
Kemijske reakcije korištene kod pojedinih modela prikazane su u nastavku i označene kvačicom. Valja napomenuti da nijedna reakcija s propanom (C₃H₈) nije korištena jer su svi ugljikovodici pretpostavljeni kao propen (C₃H₆).



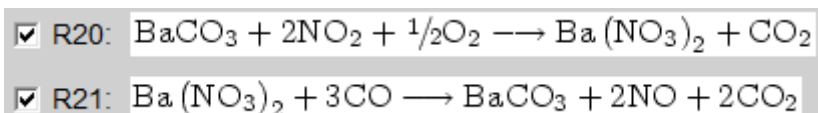
Slika 48. Osnovne reakcije oksidacije i redukcije



Slika 49. Reakcije oksidacije i redukcije cerijevih oksida



Slika 50. Reakcije oksidacije i redukcije rodija



Slika 51. Reakcije oksidacije i redukcije barijevog karbonata i nitrata

Modeli koji su korišteni:

Model 1. Osnovne reakcije redukcije i oksidacije prikazane na slici 48,

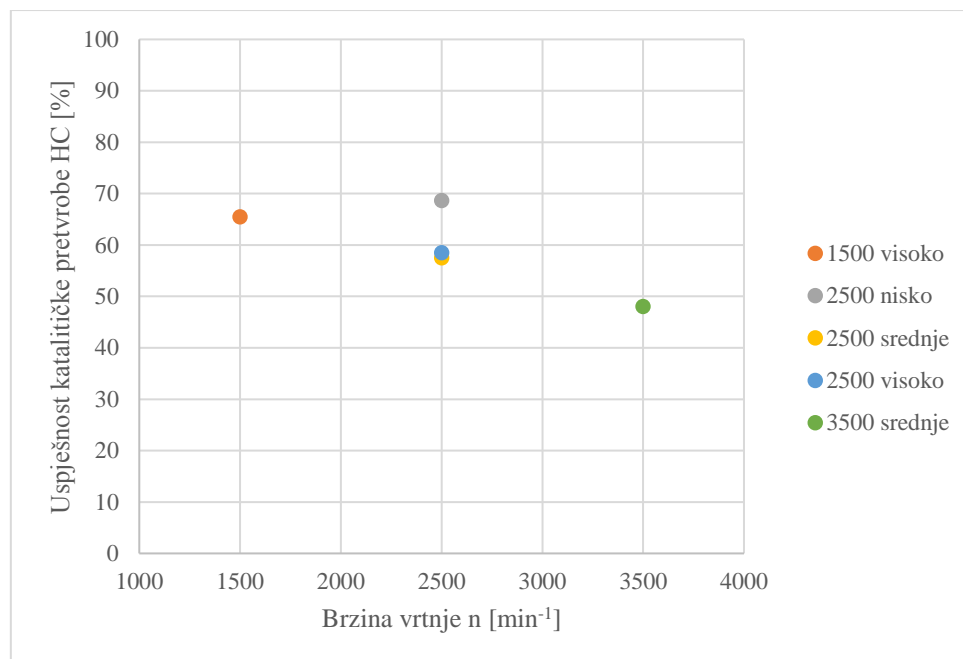
Model 2. Osnovne reakcije i reakcije oksidacije i redukcije cerijevih oksida prikazane na slikama 48 i 49),

Model 3. Osnovne reakcije i reakcije oksidacije i redukcije rodija prikazane na slikama 48 i 50,

Model 4. Osnovne reakcije i reakcije oksidacije i redukcije cerijevih i barijevih oksida te rodija prikazane na slikama 48, 49, 50 i 51.

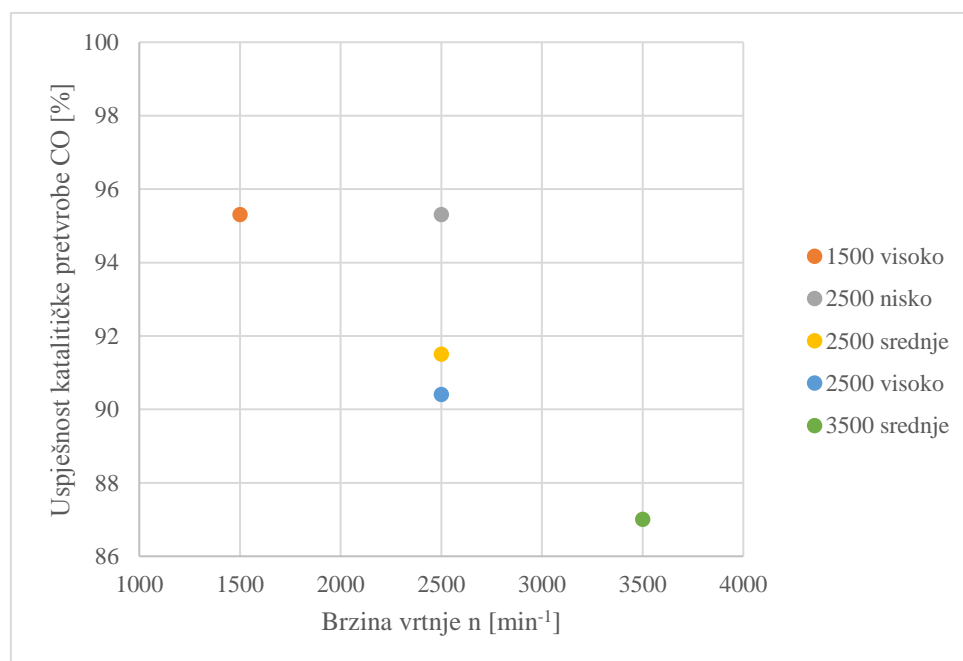
U daljnjem tekstu, modeli će biti navedeni rednim brojem.

4.4.1. Model 1



Slika 52. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 1

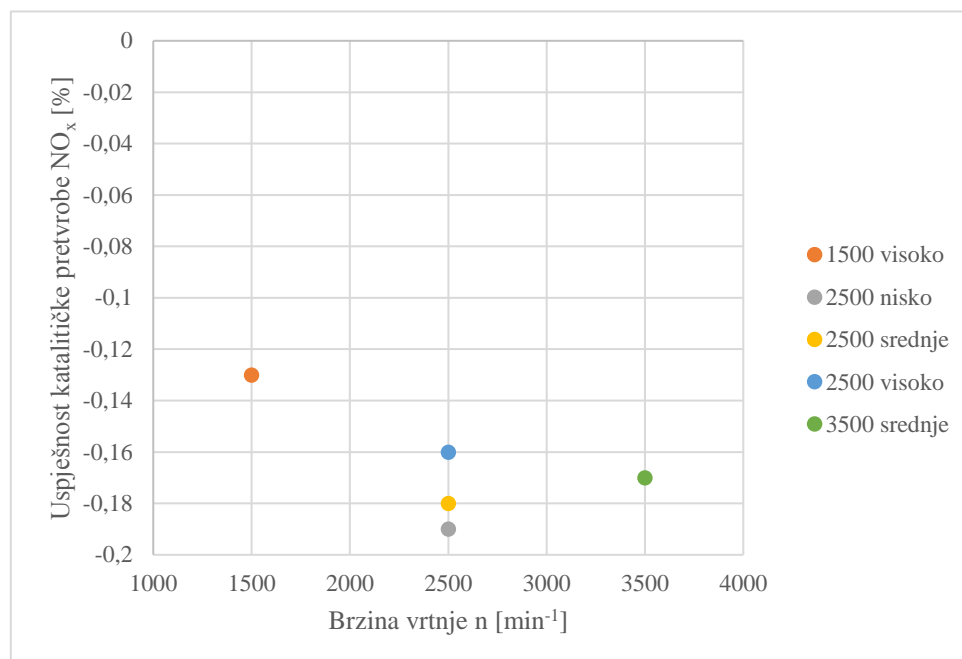
Slika 52 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 1, koja je niža od 70 % te kao takva nije u skladu ni s literaturom ni mjerenjima.



Slika 53. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 1

Slika 53 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 1, koja je u skladu s literaturom jer iznosi iznad 90% za sve točke osim točku 3500 srednje, ali je niža nego ona izračunata iz

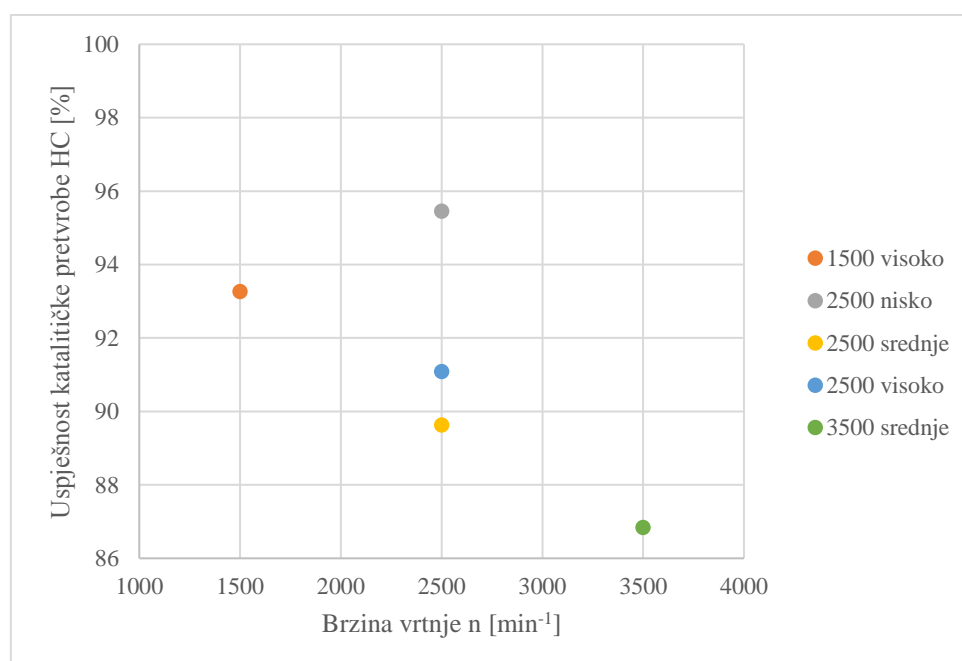
mjerenja, pogotovo za točku 3500 srednje. Porastom masenog protoka pada uspješnost katalitičke pretvorbe.



Slika 54. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x za model 1

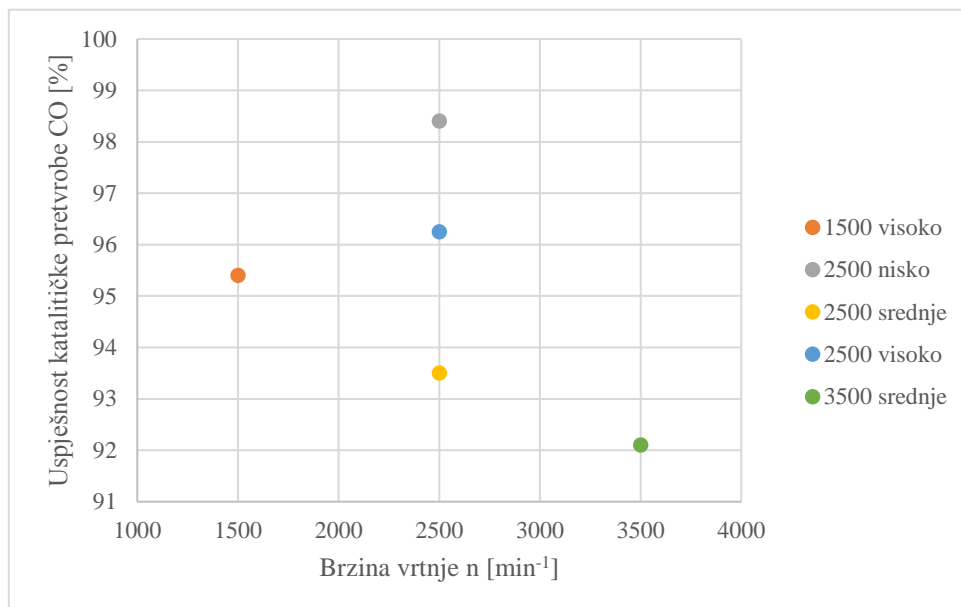
Slika 54 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x . Katalitička pretvorba je negativna, odnosno nastao je dodatni količinski udio NO_x te u potpunosti nije u skladu s literaturom.

4.4.2. Model 2



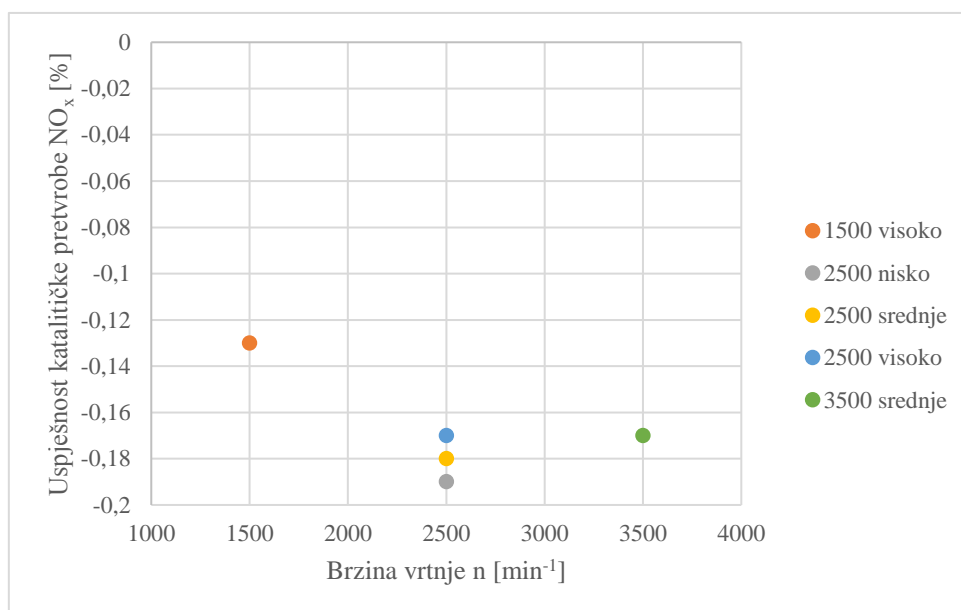
Slika 55. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 2

Slika 55 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 1, koja je u skladu s literaturom i relativno slična s izmjerenom. Također, porast masenog protoka ne utječe na smanjenje uspješnosti za točke pri brzini od 2500 min⁻¹.



Slika 56. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 2

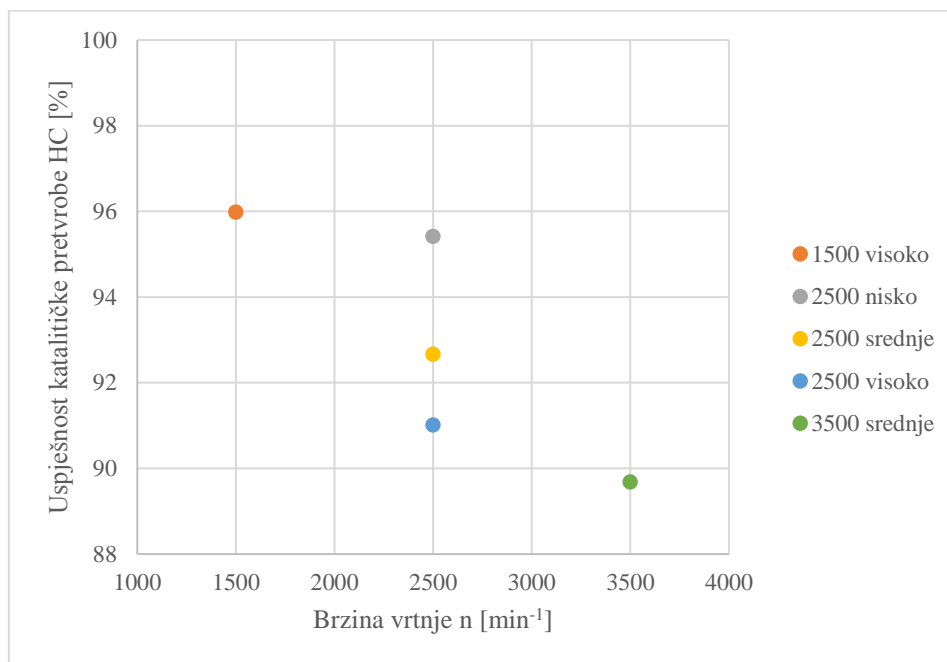
Slika 56 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 2, koja je u skladu s literaturom jer iznosi iznad 92% za sve točke osim točku 3500 srednje, ali je niža nego ona izračunata iz mjerenja, pogotovo za točku 3500 srednje. Kao i kod uspješnosti HC, povećanje masenog protoka ne utječe na smanjenje uspješnosti katalitičke pretvorbe.



Slika 57. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x za model 2

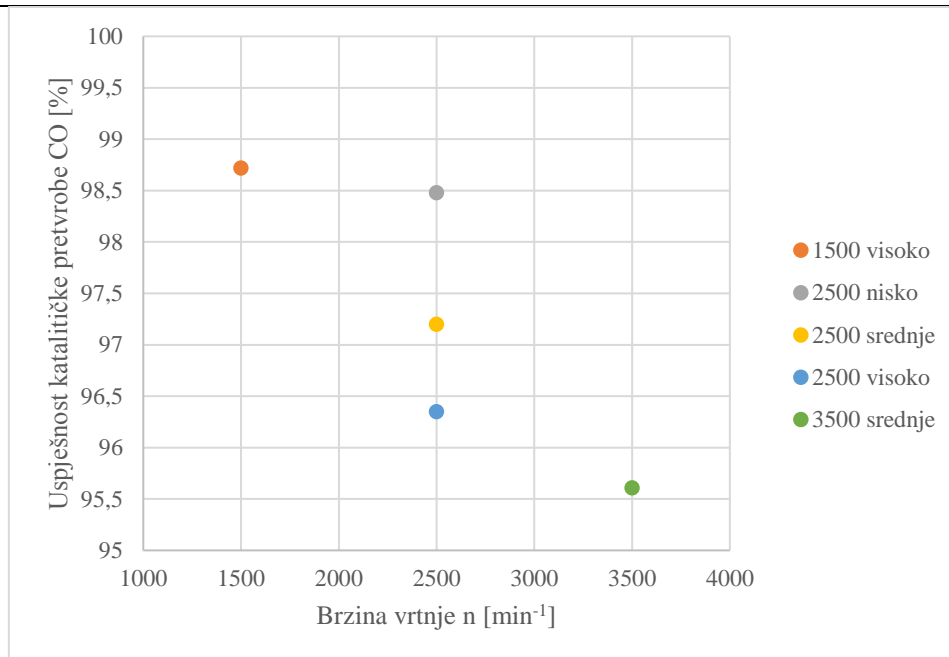
Slika 57 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x za model 2. Katalitička pretvorba je negativna, kao i kod modela 1, odnosno nastao je dodatni količinski udio NO_x što u potpunosti nije u skladu s literaturom.

4.4.3. Model 3



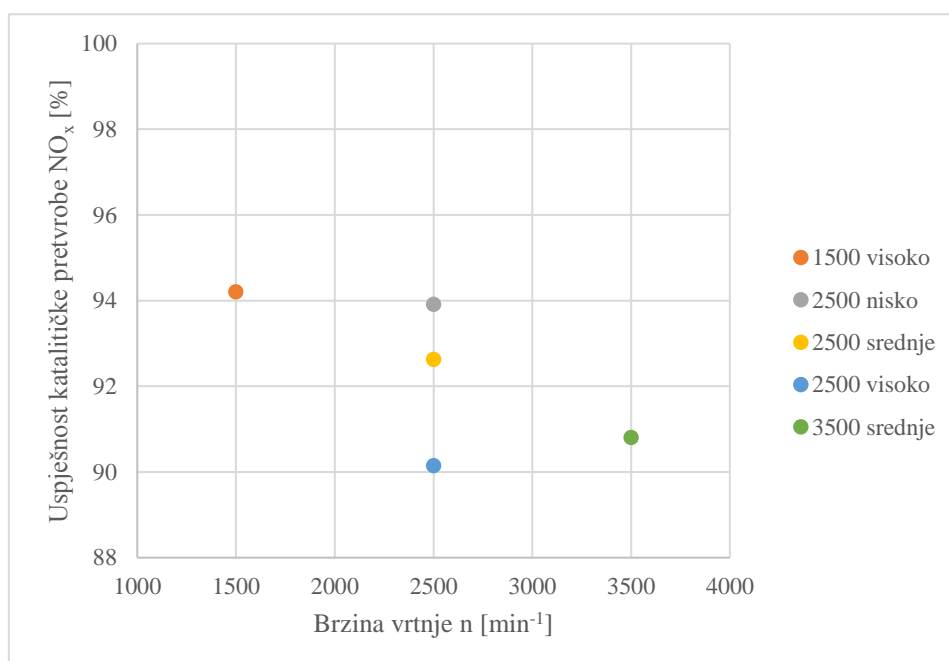
Slika 58. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 3

Slika 58 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 3. Povećanjem masenog protoka pada uspješnost katalitičke redukcije, ali dobivene veličine su u skladu s literaturom i slične su izmjerjenima. Najveća uspješnost je iznad 97 % dok je najniža nešto manja od 90 %.



Slika 59. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 3

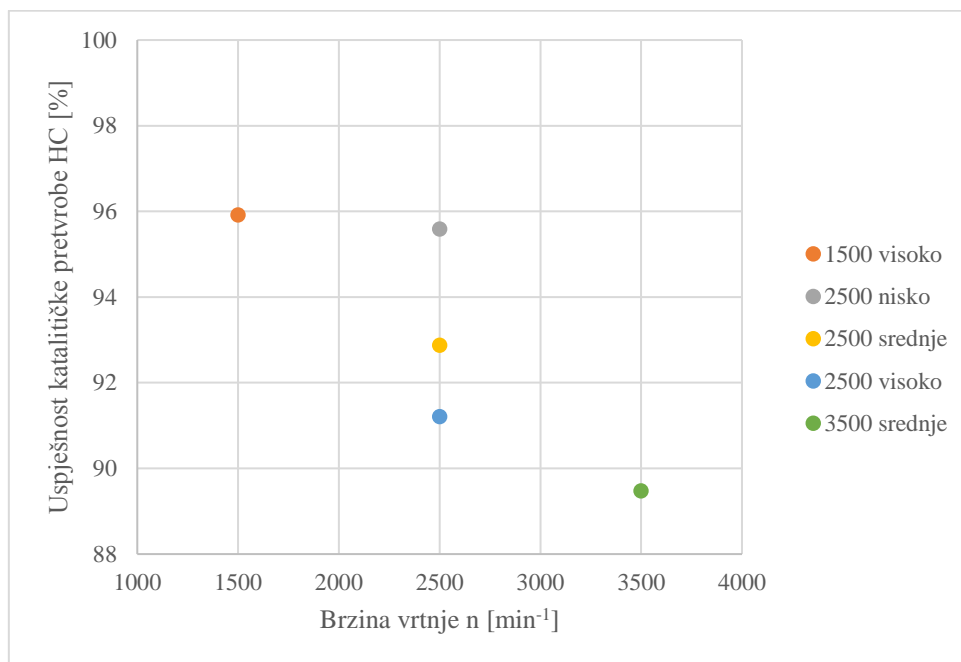
Slika 59 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe CO. Uspješnost je vrlo visoka te iznosi između 95 i 99 %. Najniža uspješnost dobivena je kod točke 1500 srednje, dok je najveća dobivena kod točke 1500 visoko. I kod CO, povećanjem masenog protoka pada uspješnost katalitičke pretvorbe. Dobiveni rezultati su u skladu s literaturom i relativno su slični izmjerenima.



Slika 60. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x za model 3

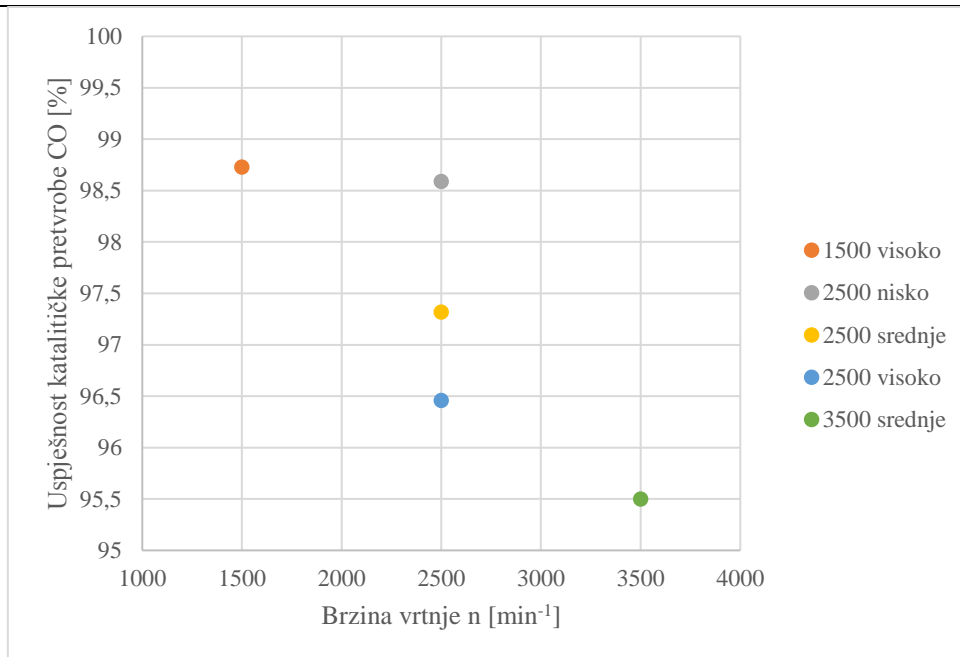
Slika 60 prikazuje uspješnost katalitičke obrade NO_x . Kao i kod pretvorbe CO i HC, porastom masenog protoka pada uspješnost obrade osim za točku 3500 srednje kad iznosi nešto više nego pri točki 2500 visoko. Dobivena uspješnost je u skladu s literaturom.

4.4.4. Model 4



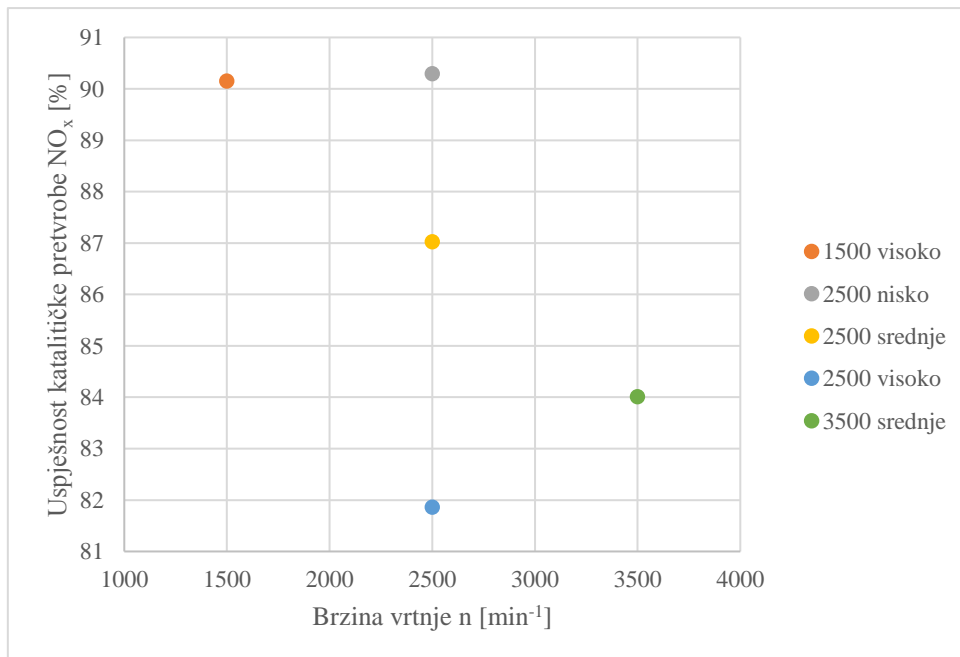
Slika 61. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 4

Slično kao i kod modela 3, uspješnost katalitičke pretvorbe HC za model 4, prikazana na slici 61, je između 96 i 89 % te je u skladu s literaturom. Također, porastom masenog protoka pada uspješnost katalitičke pretvorbe. Dobiveni rezultati su u skladu s literaturom te su relativno slični s izmjerenim.



Slika 62. Uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 4

Slika 62 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe CO za model 4. Slično kao i kod modela 3, uspješnost je vrlo visoka i pada s povećanjem masenog protoka. U skladu je s literaturom i izmjerenim vrijednostima

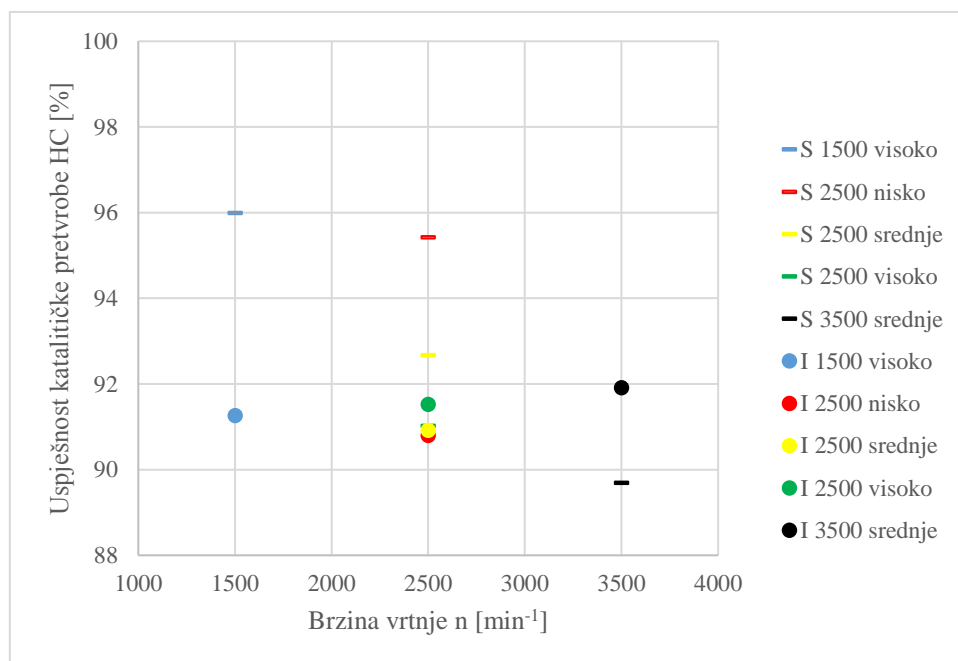


Slika 63. Uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x za model 4

Slika 63 prikazuje uspješnost katalitičke pretvorbe NO_x za model 4. Uspješnost je u granicama između 82 i 90,5 % što je malo manja vrijednost nego ona koju navodi literatura.

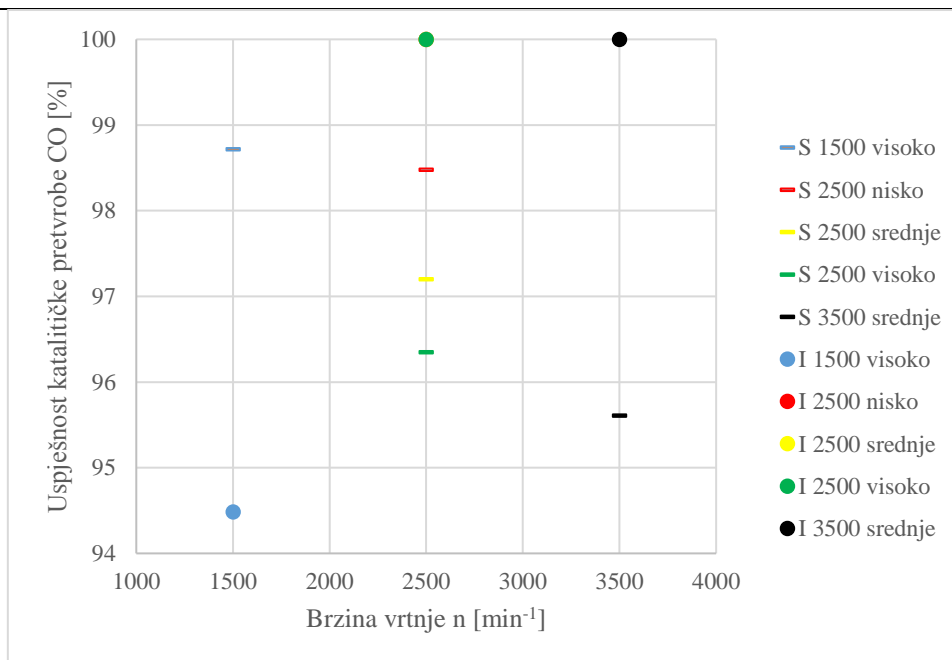
4.4.5. Usporedba izmjerenih i simuliranih vrijednosti

S obzirom da modeli 1 i 2 daju rezultate pretvorbe NO_x koja u potpunosti nije u skladu s literaturom, može se reći da ne opisuju dobro reakcije u katalizatoru. S druge strane, modeli 3 i 4 daju dosta precizne rezultate za pretvorbu HC i CO. No, model 3 daje nešto veće vrijednosti pretvorbe NO_x nego model 4 te će se iz tog razloga koristiti za usporedbu s izmjerenim vrijednostima.



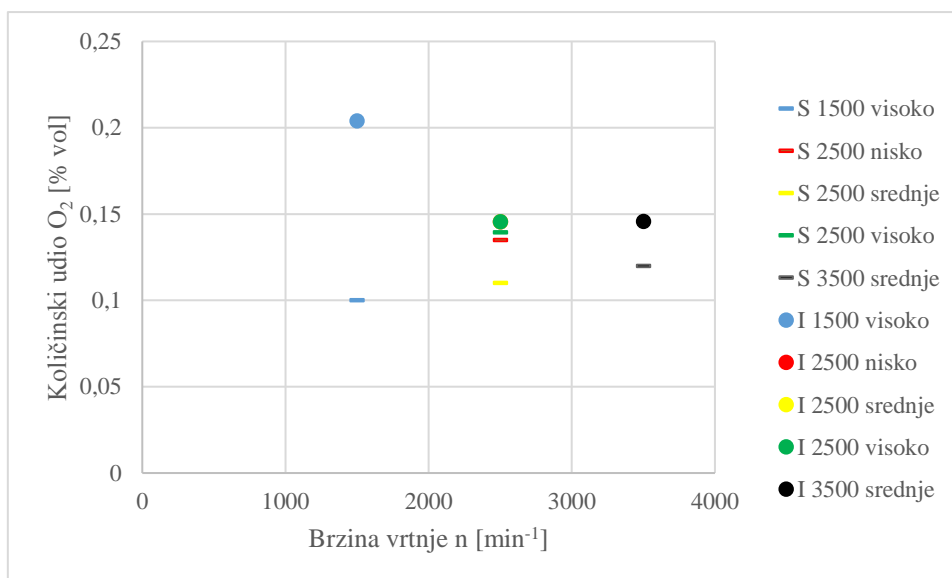
Slika 64. Usporedba uspješnosti pretvorbe HC za simulaciju i za izmjerene vrijednosti

Slika 64 prikazuje usporedbu uspješnosti pretvorbe HC za simulaciju i za izmjerene vrijednosti. Simulirane vrijednosti označene su crticama, dok su izmjerene vrijednosti prikazane krugovima. Najveća točnost postignuta je za točku 2500 visoko gdje su vrijednosti skoro jednake, dok je najveća greška dobivena za točku 1500 visoko gdje iznosi preko 4 postotna poena, odnosno oko 6 % vrijednosti.



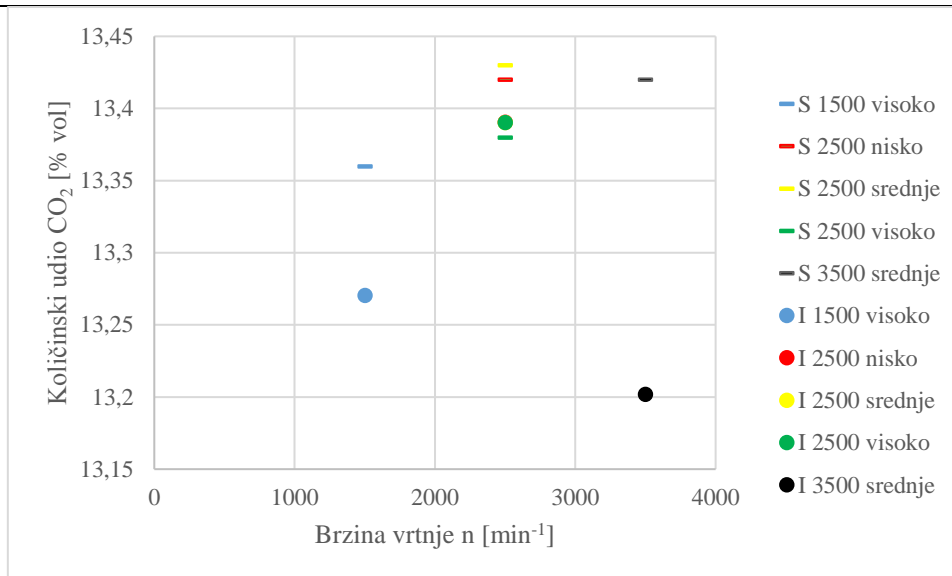
Slika 65. Usporedba uspješnosti pretvorbe CO za simulaciju i za izmjerene vrijednosti

Slika 65 prikazuje usporedbu uspješnosti pretvorbe CO za simulaciju i za izmjerene vrijednosti. Najveća preciznost dobivena je za točku 2500 nisko gdje iznosi oko 1,5 posto, a najlošiji rezultati su dobiveni za točke 1500 visoko i 3500 srednje gdje iznose oko 4,5 postotnih poena.



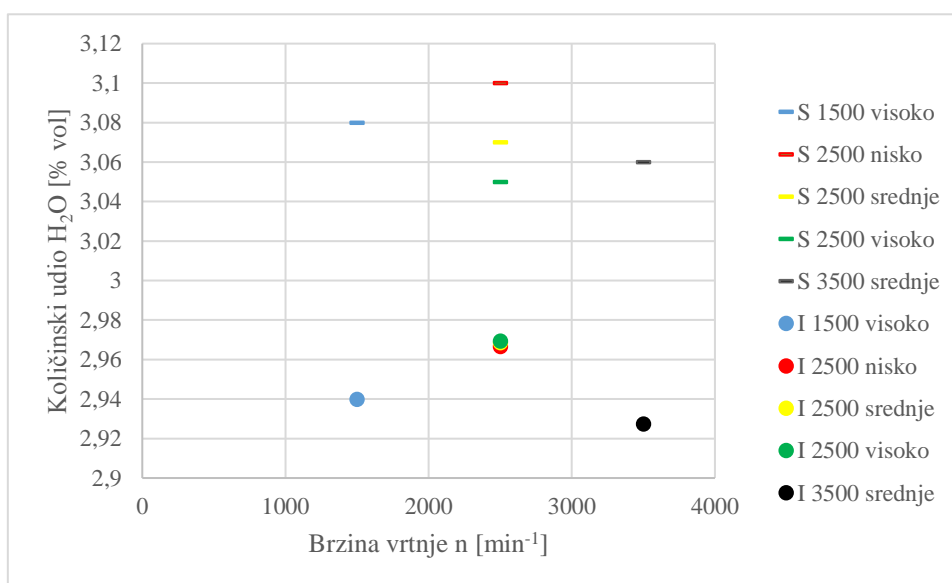
Slika 66. Usporedba količinskog udjela kisika nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje

Slika 66 prikazuje usporedbu količinskog udjela kisika nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje. Najveća preciznost je dobivena za točku 2500 visoko, a najveće odstupanje za točku 1500 visoko gdje iznosi čak 50 %. No, druge su točke unutar 15 % razlike.



Slika 67. Usporedba količinskog udjela CO₂ nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje

Slika 67 prikazuje usporedbu količinskog udjela CO₂ nakon katalitičke obrade za simulacije i za mjerenja. Najveća preciznost dobivena je kod točke 2500 visoko, dok je najveće odstupanje bilo za točku 3500 srednje za koju odstupanje iznosi oko 1,5 %. Simulacijama je dobivena veći količinski udio za sve točke osim za točku 2500 visoko.



Slika 68. Usporedba količinskog udjela H₂O nakon katalitičke obrade za simulaciju i mjerenje

Slika 68 prikazuje usporedbu količinskog udjela H₂O nakon katalitičke obrade za simulaciju i za mjerenje. Količinski udio dobiven simulacijom veći je nego onaj izračunat na temelju mjerenja za sve točke. Kao i u prethodna dva slučaja, maksimalna točnost dobivena je za točku 2500 visoko dok je najveće odstupanje za točku 1500 visoko gdje iznosi oko 4,5 %.

5. ZAKLJUČAK

Iz rezultata dobivenih mjerenjem nanovo je dokazana korist uporabe trokomponentnog katalizatora pri smanjenju štetne emisije. Mjerenja pokazuju da se štetna emisija ugljikovog monoksida (CO) smanjila za iznad 95 % za točku 1500 visoko, dok se za sve ostale odabrane točke rada smanjilo za 100 %. Smanjenje emisije ugljikovodika (HC) iznosi između 90 i 92 %, a najveće je bilo za točku rada 3500 srednje, dok je najmanje za točku 2500 nisko. S druge strane, nameće se pitanje točnosti mjernog uređaja te se uvidjela kompliciranost ovakvih mjerenja na osobnom vozilu. No, mjerenjem se došlo do vrijednih rezultata potrebnih za validaciju modela simulacija.

Rezultati dobiveni simulacijom ciklusa rada motora u programskom paketu AVL Boost vrlo precizno se poklapaju s najvećom snagom motora. Simuliranjem uvjeta sličnih uvjetima pri mjerenju, dobiveni su početni rubni uvjeti potrebni za daljnju simulaciju obrade ispušnih plinova.

Rezultati dobiveni simulacijom obrade ispušnih plinova u programskom paketu AVL Boost također daju visoke vrijednosti smanjenja emisije CO, između 95 i 99 %, no u prosjeku su dobivene niže vrijednosti nego stvarnim mjerenjem. Najveća uspješnost pretvorbe bila je za točku 1500 visoko, dok je najniža bila za točku 3500 srednje. Uspješnost katalitičke pretvorbe HC je između 96 %, simulirano za točku 1500 visoko, i 89 % simulirano za točku 3500 srednje. U usporedbi s izmjerenim rezultatima, rezultati za točke 1500 visoko te za točku 2500 nisko veći su nego izmjereni dok su za ostale 3 točke približno jednaki. Uspješnost katalitičke obrade dušikovih oksida (NO_x) iznosi za sve točke iznad 90 % te je kao takva slična onoj koju navodi literatura. Poklapanje veličina

Rezultati dobiveni simulacijom obrade ispušnih plinova relativno dobro opisuju reakcije u katalizatoru. Najpreciznije rezultate dobivene su simulacijom modela koje su sadržavale kemijske reakcije oksidacije i redukcije ispušnih plinova međusobno i oksidacije i redukcije površine koja sadrži rodij. No, vrlo je teško napraviti model koji precizno obuhvaća ovako široko područje rada motora pogotovo uz činjenicu da su veličine poput masenog protoka kroz katalizator i temperature u katalizator dobivene simulacijom, a ne mjerenjima. Nadalje o samom katalizatoru se nije znalo gotovo ništa osim vanjskih dimenzija te tipa (trokomponentni) što je sigurno djelovalo na daljnju točnost simuliranih rezultata.

LITERATURA

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: Motori s unutarnjim izgaranjem Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [2] Heywood: Internal combustion engines fundamentals, 1988, MIT
- [3] Richard Stone: Introduction to Internal Combustion Engines, Third Edition
- [4] <http://wltpfacts.eu/>
- [5] Kozarac, Sjerić, Šagi: Predavanja iz kolegija „Računalne simulacije u razvoju motora i vozila“; Sveučilište u Zagrebu
- [6] [http://www.parker.com/parkerimages/euro_tfd/cat/english/Katalogteile%204100-6/Kapitel%20I/4100-6-UK%20I%20\(DIN%20fittings\).pdf](http://www.parker.com/parkerimages/euro_tfd/cat/english/Katalogteile%204100-6/Kapitel%20I/4100-6-UK%20I%20(DIN%20fittings).pdf)
- [7] <http://www.img-ventili.hr/main.php?action1=csuprabw&lang=cro>
- [8] LPS 3000 Standard operating instructions
- [9] Tecnotest Multigas 488 operating instructions
- [10] <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-fuels-diesel-and-gasoline/>
- [11] Toni Bodrušić; Rekonstrukcija analizatora ispušnih plinova, Diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [12] AVL: BOOST Users Guide
- [13] AVL: FIRE BOOST Aftertreatment
- [14] Günter P. Merker, Christian Schwarz, Gunnar Stiesch, Frank Otto: Simulating Combustion, Springer

PRILOZI

I. CD-R disc